МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Посвящается
Всемирному дню авиации и космонавтики

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'25

XX Международная конференция по электромеханике и робототехнике

15–16 апреля 2025 г.

Сборник докладов

Санкт-Петербург
2025

УДК 001
ББК 72
З-13

З-13 Завалишинские чтения'25: XX Международная конференция по электромеханике и робототехнике (СПб., 15–16 апр. 2025 г.): сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2025. – 383 с.
ISBN 978-5-8088-2020-3
DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20

Помещенные в сборник доклады отражают результаты научных исследований по решению актуальных проблем развития современной науки и техники: от проектирования отдельных элементов и устройств, технологий их создания, решения вопросов диагностики и разработки прикладного программного обеспечения до построения сложных систем и комплексов, различных по своему функциональному назначению.

Оргкомитет конференции

Председатель конференции
Ю. А. Антохина – доктор экономических наук, профессор, ректор ГУАП

Сопредседатели конференции:
О. А. Баулин – кандидат технических наук, доцент, ректор УГНТУ
С. Г. Емельянов – доктор технических наук, профессор, ректор ЮЗГУ
Ю. А. Железнов – кандидат технических наук, доцент, директор ИЭЭ РАН
И. В. Ковалёв – доктор технических наук, профессор, директор ОУ «Красноярский краевой Дом науки и техники Российского Союза научных и инженерных общественных объединений»
А. А. Оводенко – доктор технических наук, профессор, президент ГУАП, заведующий кафедрой ЮНЕСКО «Дистанционное инженерное образование», академик Метрологической академии РФ
С. В. Солёный – кандидат технических наук, доцент, проректор по образовательным технологиям и инновационной деятельности, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники ГУАП

Председатель программного комитета
В. Ф. Шишлаков – доктор технических наук, профессор, директор Института киберфизических систем ГУАП

Члены программного комитета:
С. В. Беззатеев – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационной безопасности ГУАП
Е. Г. Пахомова – кандидат технических наук, доцент, проректор по научной работе и международной деятельности ЮЗГУ
А. Ф. Супрун – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Института кибербезопасности и защиты информации СПбПУ
Н. Б. Филимонов – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, заместитель заведующего кафедрой, профессор МГУ им. М. В. Ломоносова, профессор МГТУ им. Н. Э. Баумана
Е. А. Фролова – доктор технических наук, доцент, директор Института фундаментальной подготовки и технологических инноваций, главный редактор научного журнала «Инновационное приборостроение» ГУАП
М. И. Хакимьянов – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий, главный редактор научного журнала «Электрические и информационные комплексы и системы» УГНТУ
Л. И. Чубраева – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заведующая лабораторией электроэнергетики Института электрофизики и электроэнергетики РАН, главный научный сотрудник Института химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН
В. А. Ямщиков – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, руководитель научного направления электроразрядной лазерной техники Института электрофизики и электроэнергетики РАН, Москва
С. Ф. Яцун – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники ЮЗГУ

УДК 001
ББК 72

ISBN 978-5-8088-2020-3
DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20

© Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2025

UDC 12.03.56 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-3-8**

S. S. Beknazarova*
Dr. Sc., Tech., professor
**Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad Al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan*

IMAGE REGISTRATION ALGORITHM BASED ON OBJECT PATTERN SEARCH AND MATCHING METHODS

The paper presents an image registration algorithm based on object pattern search and matching methods. The main task of the algorithm is to accurately register images obtained from different sources or under different shooting conditions, such as scale, viewing angle, or illumination. The paper describes the stages of image preprocessing, key feature extraction, and the application of matching and transformation methods to achieve accurate superposition. The proposed algorithm can be applied in such areas as visualization and computer vision. The experimental results confirm the high accuracy and efficiency of the proposed method when working with various types of images.
Keywords: *image processing, key feature extraction, matching and transformation methods, superposition, object image matching.*

С. С. Бекназарова*
доктор технических наук, профессор
**Ташкентский Университет Информационных Технологий Имени Мухаммада Аль-Хорезми, Ташкент, Узбекистан*

АЛГОРИТМ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ОСНОВАННЫЙ НА МЕТОДАХ ПОИСКА И СОПОСТАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО ОБРАЗЦУ

В статье представлен алгоритм регистрации изображений, основанный на методах поиска и сопоставления изображений по шаблону объекта. Основная задача алгоритма заключается в точной регистрации изображений, полученных из разных источников или при разных условиях съемки, таких как масштаб, угол обзора или освещенность. В статье описаны этапы предварительной обработки изображений, выделения ключевых признаков и применения методов сопоставления и преобразования для достижения точного наложения. Предложенный алгоритм может быть применен в таких областях, как визуализация и компьютерное зрение. Результаты экспериментов подтверждают высокую точность и эффективность предложенного метода при работе с различными типами изображений.
Ключевые слова: *обработка изображений, выделение ключевых признаков, методы сопоставления и трансформации, суперпозиция, сопоставление изображений объектов.*

Introduction

Combining heterogeneous images is an important task in such areas as medical imaging, satellite imagery processing, robotics, and computer vision. Images obtained from different sources or using different shooting methods can vary significantly in scale, resolution, viewing angle, illumination, and other characteristics. In this regard, there is a need to develop algorithms that allow for accurate aligning of such images for subsequent analysis and interpretation [1].

One of the effective approaches to solving this problem is the use of methods for searching and matching images of objects. These methods are based on the selection of characteristic features of images, their comparison and subsequent application of transformations for alignment. Combining images by searching for common objects or their images allows taking into account geometric and photometric differences, which makes this approach universal and applicable to various types of data [2].

The purpose of this paper is to propose and study an image matching algorithm based on object image search and matching methods. The paper will cover the main stages of the algorithm, including image preprocessing, key feature extraction, matching and transformation methods. The effectiveness of the proposed algorithm will be tested on several types of images, demonstrating its versatility and applicability in various fields [3].

Methodology

Combining heterogeneous images is an actively researched topic in the field of computer vision and image processing. In this area, there are many approaches and algorithms that are aimed at solving the problem of registering and superimposing images obtained from different sources.

In the work of Lowe and Bauer, the SIFT and SURF algorithms are proposed, respectively, and are among the most popular for extracting keypoints from images [7]. SIFT (Lowe, 2004) extracts stable points that are invariant to scale and rotation, which allows them to be used effectively for matching. SURF (Bay et al., 2006) offers a faster alternative, while maintaining robustness to various distortions. These methods serve as the basis for many modern approaches to image alignment [8].

Mikolajczyk & Schmid, 2005 [9] discusses various feature matching algorithms such as nearest neighbors (NN) and FLANN, which is used to quickly find matches among a large number of points. The authors emphasize the importance of proper matching and post-processing to improve the accuracy and robustness of the algorithms.

In the study by Fischler & Bolles, image registration is a key problem, which is solved using different approaches. Algorithms based on affine and projective transformations, such as RANSAC, are used to determine the transformation between two images based on the matched features. These methods allow for the elimination of outliers and provide more accurate registration.

Work (Zhang et al., 2017) consider algorithms that not only combine images but also integrate them to create a single representation. Such methods find application in medical imaging and robotics, where it is necessary to obtain a complete representation of an object based on several images [10].

The work (Wang et al., 2020) describes the application of fusion algorithms to improve the accuracy of satellite images, which highlights the importance of this task in various fields. Image fusion is actively used in medicine (for the analysis of MRI and CT images), in aerial photography and satellite systems, as well as in automatic control systems and robotics [11].

Thus, the literature review demonstrates the diversity of approaches and methods used to combine heterogeneous images. The use of modern algorithms for feature extraction and comparison, as well as registration methods, allows achieving high accuracy and stability in solving this problem. This article will present a new algorithm that combines the best practices of existing methods and adapts them for effective combination of heterogeneous images.

The following methods were used to develop and analyze the algorithm for combining heterogeneous images: image preprocessing, feature extraction methods, feature matching methods, affine and projective transformations, evaluation of the alignment accuracy, and algorithm performance analysis.

The first step was to normalize the images to eliminate differences in brightness, contrast, and scale. Filters were applied to eliminate noise and improve image quality, which is an important step for subsequent feature extraction. Feature detectors such as SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) and SURF (Speeded-Up Robust Features) algorithms were used to find key points in the images. These methods allow for the extraction of feature points in images that are robust to scaling and rotation.

After feature extraction, keypoint matching methods were used between two images. Algorithms such as Nearest Neighbor and Fast Library for Approximate Nearest Neighbors (FLANN) were used to efficiently find corresponding points between images.

Affine and projective transformations were used to align the images. The use of transformation methods such as RANSAC (Random Sample Consensus) allowed us to determine the transformation parameters and eliminate errors caused by outliers or false matches.

To evaluate the effectiveness of the proposed algorithm, image matching metrics such as root mean square error (RMSE) and visual assessment of the overlap were used. The alignment quality was experimentally tested on various datasets, including medical and satellite images.

The execution time of each stage of the algorithm was analyzed for different types of images. The method's robustness to changes in scale, rotation angle, and noise levels in the images was also assessed.

The following data is fed to the input of the artificial intelligence system, which performs data matching and searches for images of objects

present in the image: B – original image; M – original object data; *coord* – the function of transforming the coordinates *(i,j)* of a pixel b_{ij} in a photograph B into the coordinates of x_{ij},y_{ij}, a point M in accordance with the coordinate system and projection of the photograph B.

Let us describe an algorithm for combining heterogeneous images by searching and comparing images of objects, The output of the artificial intelligence system is a set of pairs of matching points $P_{raw\,edu}$, which are then used to calculate a set of pairs of points P_{edu} and a function $comp$ that describes the resulting combination of the image B and frame ...

The artificial intelligence system consists of the following modules:

1. module for highlighting characteristic images in a photograph (1);

2. characteristic image classification module (2);

3. module for searching for matches between images selected in the photograph and objects present in the frame (3).

$$P_{raw\,edu} = find_{edu}\left(B, M, crood\right) =$$

$$conform\left(B, M, coord, classification\left(separation\left(B\right), desc\right)\right);$$

$$H = separation\left(B\right); \quad (1)$$

$$C = classification\left(H, desc\right); \quad (2)$$

$$P_{raw\,edu} = conform\left(B, M, coord, C\right); \quad (3)$$

$$C = \left\{c\right\},\ c \subset H;$$

$$\forall c_m; c_n \in C;\ c_m \cap c_n = \varnothing;$$

$$\nu = desc\left(h\right);$$

$$\nu = \left\{\nu_1, \nu_2, \ldots, \nu_{\varnothing}\right\};\ \forall \nu_0 \in \mathbb{R};\ \text{È} \in \mathbb{N}; \quad (4)$$

$$h_c \in c; \qquad h_c \in H. \quad (5)$$

The module *separation* performs the selection of images of objects in the image B. The images h form a set of selected images H. Th H e module outputs *classification* a set of classes $C = \left\{c\right\}$. The classes do not intersect with each other, that is, each image h must be assigned to only one class.

A set of classified images (set of classes) C is fed to the input of the module *confor*. The module *conform* searches for matches between images from classes C and objects in the frame M using information about the classes of images and their position in the image. The output of the module *conform* is a set of pairs of matching points,

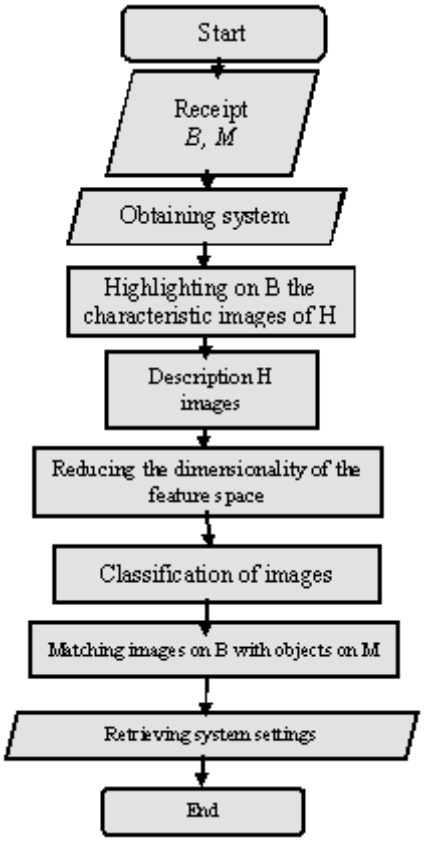


Fig. 1. Algorithm for modeling an artificial intelligence system

$P_{raw\,edu}$ which are then used to calculate a set of pairs of points P_{edu} and the function $comp'$.

Description: module *separation* – multidimensional neural map of Kohonen, module *desc* – algorithms for describing images based on the use of energy characteristics of Lavs and texture features of Haralick, algorithm for reducing the dimensionality of the feature space based on the use of a PCA network; module – *classification* tree classifier, ANN of direct propagation without feedback and support vector machine, module *conform* – multi-stage algorithm consisting of a search algorithm and an algorithm for probabilistic assessment of the correspondence of an image h selected in a photograph B to objects in the frame M located near points $\left\{coord\left((i,j)\right)\right\}$; $\forall b_{ij} \in h$.

The scheme of the algorithm for modeling the artificial intelligence system is shown in Fig. 1. The modeling algorithm consists of the following stages:

1) selection of characteristic images in the image (1) using the multidimensional Kohonen neural map;

2) description of the selected images (4) using the energy characteristics of Lavs and the textural features of Haralik;

3) reducing the dimensionality of the feature space using PCA-sega;

4) classification of characteristic images (2) using a tree-type classifier;

5) search for correspondences between the images highlighted in the photograph and the objects present in the frame (3).

There are several approaches to image extraction using the function *separation*. The most efficient in terms of execution time and required computing resources, and allowing one to obtain a result of sufficient quality for further alignment, is the approach based on the use of the multidimensional Kohonen neural map [1,2].

Let be $V=\{v\}$ a vector space defined over $[-1;1]$ and containing vectors of spectral brightnesses $(|v|=K)$ v K). For a photograph B, it is therefore true that $B \subset V$.

The image extraction algorithm consists of the following stages:

1) classification of spectral brightness vectors of image pixels B using a multidimensional Kohonen neural map;

2) clustering of an image B to produce multiple $Q=\{q\}$ clusters.

Each cluster q is a closed set of pixels from B, assigned to the same class.

The clustering algorithm consists of line-by-line scanning B, classification of each pixel and gradual growth of the resulting clusters;

3) filtering of the selected clusters with the formation of a set of selected images at the output H. For each cluster, q a quantitative assessment of the cluster's usefulness for further combination is calculated *quality*, with the help of which a set of H images (5) selected in the image is formed:

$$H=\{q|quality(q)\geq T_{quality}\};\ \ H_{quality}\in[0;1], \quad (6)$$

ere is $T_{quality}$ the threshold value that determines the minimum cluster utility score q at which the cluster will be included in the set H of selected images. The value .. is one of the adjustable parameters of the matching algorithm. *quality* The following requirements are imposed on K:

– the estimate must be defined everywhere on and continuous throughout the entire domain of definition;

– the range of values of the estimate is the range [0; l];

– The value of the assessment should be greater, the higher the usefulness of the cluster q for further combination.

as *quality*. Experimental studies have shown that the best estimate in terms of time costs and quality of the result is the one based on the calculation of the cluster area q:

$$quality(q)=\frac{sqrt(|q|)}{\alpha};\ \ \alpha=IJ, \quad (7)$$

where α is the normalization coefficient equal to the number of pixels in the image B (i.e. equal to the area of the image B, expressed in pixels).

The key element of the pattern extraction algorithm is the multidimensional Kohonen neural map, which classifies the pixels of the image B.

The multidimensional Kohonen neural map performs a partition of the original vector space V into a set of classes $\{V'_\omega\};\ V'_\omega \subset V$, each of which consists of vectors that are closest to the central vector v'_ω of a given class in the sense of the distance measure used d.

A neural map is a multidimensional grid of neurons, each of which calculates a measure of the distance between an input vector and the central vector of the corresponding class.

Let $s=\{s_1,\ldots,s_n,\ldots,s_N\};\ s_n \in N$ –vector of map dimensions. Each neuron located at a nodal point of the map with coordinates $w=\{w_1,\ldots,w_n,\ldots,w_N\}$ can be assigned a vector v'_ω, central for V'_ω the selected class, where $w=w_1+\sum_{n=2} S_{n-1}(w_n-1)$ is the class number. It is important to note that $w \in N$.

The vector s is one of the parameters of the alignment algorithm and is selected by the operator.

The neural map belongs to the class of ANNs trained without a teacher. The neural map is trained using the Kohonen neural map self-organization algorithm.

The algorithm for classifying image pixels B using a multidimensional Kohonen neural map consists of the following steps:

1) initialization of the neural map – selection of parameters, initialization of v'_ω neuron weight vectors;

2) self-organization of the map on the set $B \subset V$;

3) running the map for each pixel $b \in B$, assigning the pixel to one of the acceptable classes V'_ω.

The principle of operation of the multidimensional Kohonen neural map is illustrated in Fig. 2. In Fig. 2, a three-dimensional map describes a two-dimensional vector space in accordance with its statistical characteristics. The discrepancy in dimensionality (a map of a higher dimensionality

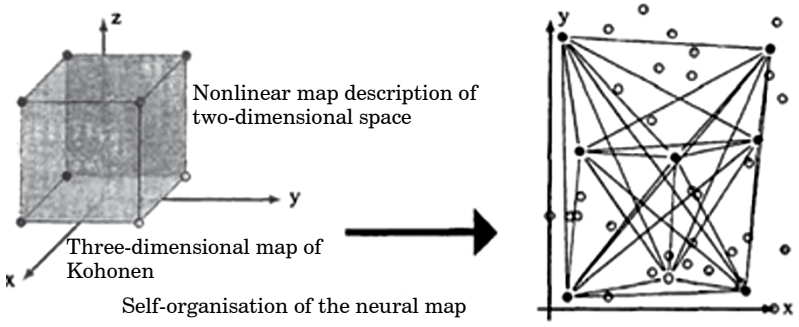


Fig. 2. Segmentation of two-dimensional space using three-dimensional Kohonen map

describes a space of a lower dimensionality) allows for nonlinearity of description, which has a positive effect on the quality of the classification performed and, accordingly, on the quality of space segmentation.

As a distance measure d on a vector space V. Experimentally, it turned out that using the Euclidean distance (8) as such a metric is the best choice in terms of time characteristics in terms of assessing the quality of alignment.

$$d(v_1, v_2) = \sqrt{\sum_{k=1}^{K} (v_{1k} - v_{1k})^2}. \quad (8)$$

In the case of using the Euclidean distance as a metric, d the task of training a neural map is reduced to constructing a partition of the Voronov set B, i.e., to a partition that minimizes the variance in the resulting classes relative to the corresponding central vectors.

Results

In the course of the study, an algorithm for combining heterogeneous images based on methods for searching and matching object keypoints was proposed and implemented. The main task was to combine images that differ in scale, viewing angle, and lighting, which is a common problem in areas such as medical imaging and satellite data processing.

The algorithm was tested on various types of images, photographs taken under different lighting conditions and with different viewing angles. The experiments showed high efficiency of the proposed approach.

When using SIFT and SURF algorithms for feature extraction, the algorithm demonstrated high accuracy of image alignment, even with significant differences in scale and orientation. On average, the deviation of matching points after transformations remained within 1-2 pixels, indicating high accuracy of superposition.

The algorithm demonstrated robustness to distortions such as scale, rotation, and lighting changes. The use of affine and projective transformation methods in combination with RANSAC allowed us to effectively eliminate outliers and find accurate transformation parameters.

One of the key factors affecting performance was the complexity of keypoint matching. For small images, the algorithm showed acceptable processing time, but with increasing image resolution and the number of keypoints, the speed of operation decreased. Using accelerated search algorithms, such as FLANN, helped to partially solve this problem.

The results of the study showed that the proposed algorithm can effectively solve the problem of combining heterogeneous images using keypoint search and matching methods. However, as with any algorithm, there are limitations. One of the problems is the decrease in performance when working with very high-resolution images or with a large number of details, which requires additional optimization methods.

In addition, challenging cases where the image contains few distinct features (e.g., uniform surfaces or textures) require further improvements, possibly using deep learning techniques to improve feature extraction. The introduction of machine learning techniques such as convolutional neural networks (CNN) can improve the accuracy of feature extraction and make the algorithm more robust to challenging cases.

Thus, the proposed algorithm shows significant potential for application in various fields requiring accurate image registration and can serve as a basis for further research and development in this area.

Conclusion

In this paper, an algorithm for combining heterogeneous images based on methods for searching and matching object patterns was proposed. The main emphasis was placed on using key points and features to effectively match images that differ in scale, viewing angle, and lighting. The use of methods such as SIFT and SURF for feature extraction, as well as RANSAC algorithms for filtering outliers, made it possible to achieve high accuracy of matching.

The experimental results confirmed that the proposed algorithm successfully copes with the task of registering heterogeneous images, providing high quality of superposition and stability of operation under various distortions of the original data. This makes it applicable in such areas as medical imaging, satellite image processing and computer vision.

Future research opportunities may include optimizing the algorithm's performance to handle larger data sets, as well as integrating additional machine learning methods to improve the accuracy and automate the image alignment process.

References

1. Herbert Bay, Andreas Ess, Tinne Tuytelaars, and Luc Van Gool. SURF: Speeded Up Robust Features // Computer Vision and Image Understanding. 2018. Vol. 110, no. 3. P. 346–359.

2. *Zhang, Z.* Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations // Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision. 2009. P. 666–673.

3. *Gonzalez, R. C., Woods, R. E.* Digital Image Processing. 4th ed. Pearson, 2018.

4. KSGN Reddy, SP Gupta. Image Registration Techniques: A Survey // International Journal of Computer Applications. 2012. Vol. 975, no. 8887.

5. *Beknazarova S.S., Jaumitbayeva M.K.* Filtering of Digital Images by the Convolution Method with Pulse Characteristic in Spectral Region // AIP Conference Proceedings. 2023, 2746(1), 040004.

6. *Beknazarova S.S.* Algorithm for Splitting an Audio File by Frames/ AIP Conference Proceedings, 2023, 2746(1), 040003.

7. *Lowe D.* Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // International Journal of Computer Vision, 60(2), 91–110. DOI: 10.1023/B .0000029664.99615.94.

8. *Bai, H., Low v, D., Pozharsky, A.* Object Recognition with Gabor Features and SIFT // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2006, 1-8. DOI: 10.1109/CVPR.2006.90.

9. Mikolajczyk & Schmid A Performance Evaluation of Local Descriptors for Object Category Recognition // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2005, 57-64. DOI: 10.1109/CVPR.2005.136.

10. SIFT Meets CNN: A Decade Survey of Instance Retrieval // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 39(3), 418–430. DOI: 10.1109/ TPAMI.2016.2598105.

11. *Wang L., Jiang, S.* A Comprehensive Review on Local Feature Detection and Matching // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 42(5), 1127–1149. DOI: 10.1109/TPAMI.2019.2924370.

УДК 004.056.53 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-9-14**

А. В. Афанасьева*
старший преподаватель
Е. С. Марковский*
студент
М. Р. Никифоров*
студент
С. Д. Федоров*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ В СЕТЕВОМ ТРАФИКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ БЕЗ УЧИТЕЛЯ

В статье проведен сравнительный анализ современных методов обнаружения аномалий в сетевом трафике с использованием алгоритмов машинного обучения без учителя. Рассмотрены особенности алгоритмов isolation forest, DBSCAN и autoencoder, их преимущества, ограничения и области применения. Полученные результаты показывают, что выбор подходящего метода зависит от характера данных и целей анализа, а использование машинного обучения без учителя позволяет эффективно выявлять аномалии даже в условиях высокой изменчивости сетевого трафика.
Ключевые слова: *обнаружение аномалий, машинное обучение, алгоритмы без учителя, сетевой трафик, анализ данных.*

A. V. Afanasieva*
Senior Lecturer
E. S. Markovskiy*
Student
M. R. Nikiforov*
Student
S. D. Fedorov*
Student
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN METHODS FOR DETECTING ANOMALIES IN NETWORK TRAFFIC USING UNSUPERVISED MACHINE LEARNING ALGORITHMS

The article presents a comparative analysis of modern methods for anomaly detection in network traffic using unsupervised machine learning algorithms. The features of isolation Forest, DBSCAN, and Autoencoder algorithms are examined, including their advantages, limitations, and areas of application. The results indicate that the choice of an appropriate method depends on the nature of the data and the goals of the analysis, while the use of unsupervised machine learning enables effective anomaly detection even under conditions of high network traffic variability.
Keywords: *anomaly detection, machine learning, unsupervised algorithms, network traffic, data analysis.*

Введение

В современном мире с развитием технологий объем и сложность сетевого трафика стремительно растут. С увеличением количества смартфонов, персональных компьютеров и других устройств, подключенных к сети, а также ростом объемов передаваемых данных, возрастает необходимость обеспечения безопасности и стабильности сетевой инфраструктуры. Одной из основных задач становится выявление аномалий в сетевом трафике, которые могут свидетельствовать о сбоях, атаках и других проблемах [1].

Традиционные методы анализа сетевого трафика, основанные на сигнатурах и правилах, обладают рядом существенных недостатков, которые ограничивают их применение в условиях современных высоконагруженных сетей. Во-первых, сигнатурные методы не могут обнаруживать ранее неизвестные атаки, так как они полагаются на заранее определенные сигнатуры. Во-вторых, статистические методы часто страдают от ложноположительных срабатываний из-за сложностей в правильном определении порогов и адаптации к изменениям сетевого трафика. Кроме того, они не всегда способны эффективно работать в условиях динамически меняющихся сетей [1, 2].

В последние годы на смену традиционным подходам приходят методы машинного обучения, которые не требуют предварительных сигнатур, что делает их более универсальными при появлении новых типов угроз [2]. Они способны эффективно анализировать большие объемы данных, выявляя аномалии, которые не очевидны для сигнатурных и статистических методов. В машинном обучении существуют три основных подхода для обнаружения аномалий: обучение с учителем, без учителя и с подкреплением.

В данной статье проведен сравнительный анализ современных методов обнаружения аномалий в сетевом трафике на основе алгоритмов машинного обучения без учителя, с целью выявления их преимуществ, ограничений и областей применения.

Основные понятия и определения

Аномалии в сетевом трафике – это отклонения от нормального или ожидаемого поведения сетевых данных, которые могут свидетельствовать о наличии угроз или сбоях в работе системы. При анализе трафика необходимо выявлять аномальные события, такие как кибератаки, сбои в работе оборудования или несанкционированное использование ресурсов [3].

К основным типам аномалий в сетевом трафике относятся [3, 4]:

1. Всплески трафика – резкие увеличения объема данных в небольшой период времени, которые могут появиться в следствие DDoS атак или высокой нагрузки на сервер.

2. Падения трафика – внезапное снижение объема передаваемых данных или их полное отсутствие, в большинстве случаев связанное с отказом работы оборудования или блокировкой ресурсов.

3. Аномалии по времени – необычная активность в нетипичное время, например, резкий рост трафика ночью, когда сеть обычно простаивает.

4. Аномалии в протоколах или портах – использование нестандартных протоколов или портов, что является сигналом возможной попытки скрытого доступа или сетевой атаки.

5. Аномалии в поведение пользователей – необычные действия пользователей, например, загрузка большего количества файлов за короткий промежуток времени.

Машинное обучение эффективно справляется с обнаружением перечисленных аномалий в сетевом трафике за счет анализа больших объемов данных и выявления скрытых закономерностей. Для решения таких задач применяются следующие подходы обучения [5]:

1. Обучение с учителем – метод, при котором алгоритм обучается на размеченных данных, где каждая запись имеет метку. К основным достоинствам данного метода можно отнести высокую точность для известных аномалий и возможность классификации по заранее заданным меткам. Недостатками данного подхода являются необходимость большего объема размеченных данных, проблемы при работе с неизвестными аномалиями.

2. Обучение без учителя – это метод машинного обучения, в котором алгоритм анализирует данные без использования меток, выявляя скрытые закономерности и аномалии. К преимуществам этого метода относится способность обнаруживать ранее неизвестные аномалии, а также отсутствие необходимости в размеченных данных. Недостатками являются возможное большое количество ложных срабатываний, сложности в интерпретации результатов.

3. Обучение с подкреплением – метод, при котором алгоритм обучается через взаимодействие с окружающей средой. Преимуществами данного метода являются способность адаптации к изменяющимся условиям сети, а также эффективность в динамичных и изменяющихся средах. Основными недостатками считаются высокая вычислительная сложность, необходимость в большом количестве времени для обучения и настройке.

Каждый из описанных подходов к машинному обучению имеет свои сильные и слабые стороны, и выбор метода зависит от конкретных условий задачи. В данной работе будет проведен анализ алгоритмов машинного обучения без учителя, которые позволяют эффективно выявлять ранее неизвестные аномалии в сетевом трафике.

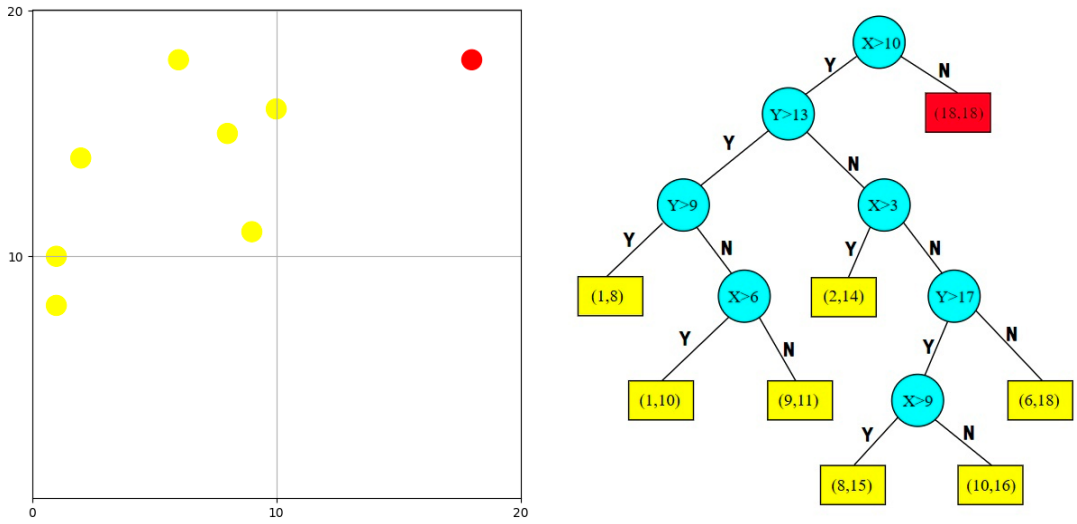


Рис. 1. Пример работы алгоритма isolation forest

Сравнение алгоритмов машинного обучения без учителя для выявления аномалий в сетевом трафике

В данном разделе будут рассмотрены основные методы обнаружения аномалий в сетевом трафике с использованием алгоритмов машинного обучения без учителя.

Одним из простых алгоритмов машинного обучения без учителя является *isolation forest*. *Isolation forest* – это алгоритм обнаружения аномалий, который основан на идее изоляции аномальных точек данных (рис. 1). Процесс работы данного алгоритма выглядит следующим образом:

1) создание множества случайных деревьев, где каждое дерево строится путем случайного выбора признаков и разбиения данных вдоль этих признаков;

2) объекты изолируются в деревьях, аномальные точки изолируются быстрее;

3) для каждого объекта вычисляется средняя глубина его изоляции по всем деревьям, и объекты с низкой глубиной изоляции считаются аномальными.

Метод *isolation forest* получил широкое распространение благодаря своей эффективности в обработке больших объемов данных и способности выявлять аномалии без необходимости использования размеченных данных. Также к преимуществам можно отнести быструю работу алгоритма и масштабируемость, что делает его подходящим для работы с большими и сложными наборами данных, такими как сетевой трафик [6].

Однако, этот метод имеет ряд недостатков. Одним из недостатков является его чувствительность к шуму и возможные ложные срабатывания, когда алгоритм может ошибочно идентифицировать данные как аномалии. Кроме того, для достижения высоких результатов в динамичных сетевых средах могут потребоваться дополнительные настройки, что увеличивает сложность его применения [6].

Еще одним алгоритмом, который обнаруживает аномалии в сетевом трафике, является *DBSCAN* (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise). *DBSCAN* – это метод кластеризации, основанный на плотности данных, который эффективно выявляет кластеры произвольной формы и способен обнаруживать шум в данных (рис. 2). Данный метод имеет следующий алгоритм выявления аномалии:

1) задаются параметры ε (радиус окружности) и MinPts (минимальное количество точек);

2) все точки, которые находятся в области радиуса ε и имеют хотя бы MinPts соседей, считаются ядрами кластера;

3) точки, которые не принадлежат ни одному кластеру, считаются аномалиями (шумом).

Алгоритм *DBSCAN* обладает рядом преимуществ. Например, он эффективно выделяет кластеры произвольной формы и хорошо справляется с шумовыми данными, автоматически классифицируя их как аномалии. Кроме того, алгоритму не требуется заранее задавать число кластеров, что упрощает его использование в задачах, где структура данных неизвестна [7].

Основным недостатком *DBSCAN* является чувствительность к выбору параметров ε и

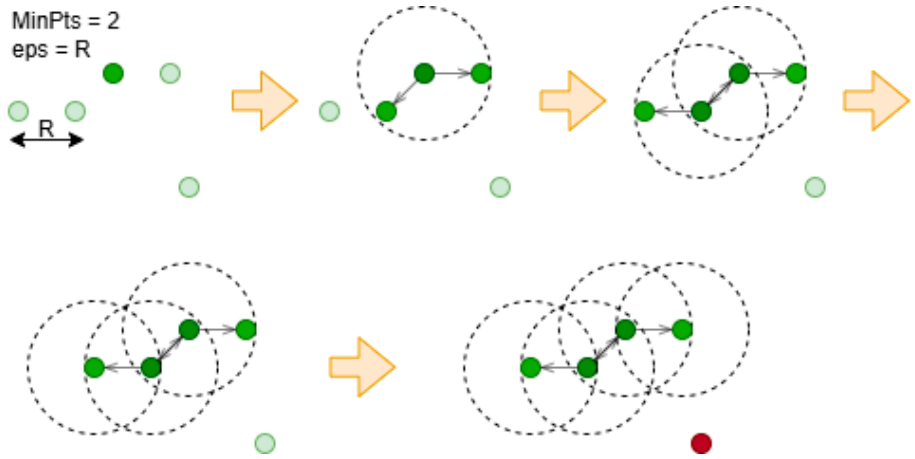


Рис 2. Пример работы алгоритма DBSCAN

MinPts, что может приводить к ошибкам кластеризации при их некорректной настройке. Также алгоритм может сталкиваться с трудностями при работе с данными, где плотность кластеров сильно различается, есть вероятность ошибочного объединения раздельных кластеров или, наоборот, разделение единого кластера на несколько частей [7].

Последним рассматриваемым алгоритмом будет *Autoencoder*.

Autoencoder – это тип нейронной сети, который учится реконструировать входные данные, сжимая их до скрытого представления и восстанавливая из этого сжатого представления (рис. 3). Алгоритм работы *Autoencoder* выглядит следующим образом:

1) автоэнкодер обучается восстанавливать исходные данные, минимизируя разницу между входом и выходом;

2) кодер уменьшает размерность данных, создавая скрытое представление, а декодер восстанавливает данные из него;

3) для каждого объекта вычисляется ошибка реконструкции, сравнивая входные и восстановленные данные;

4) объекты с высокой ошибкой реконструкции считаются аномалиями.

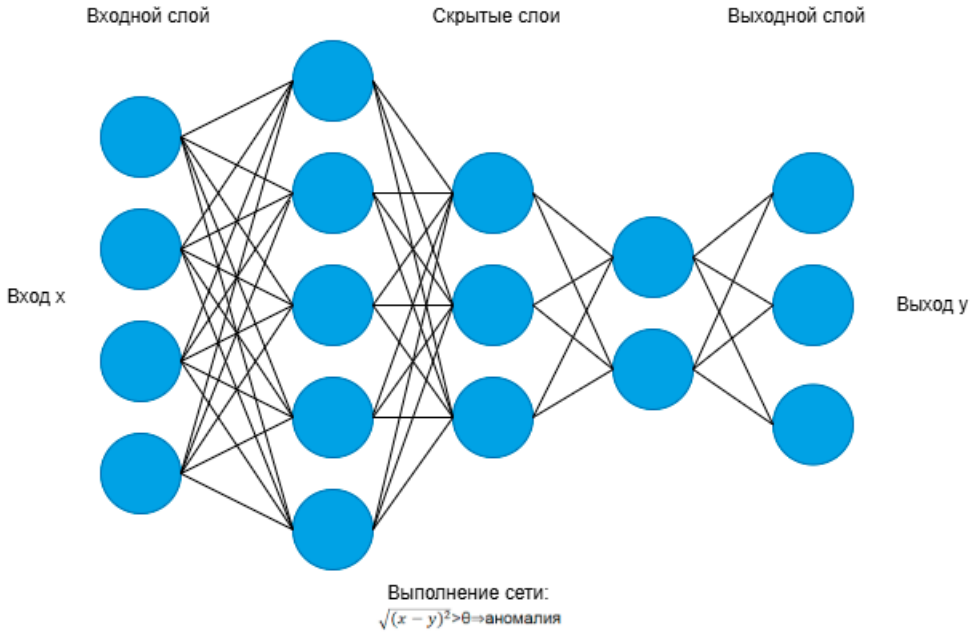


Рис. 3. Архитектура автоэнкодера для обнаружения аномалий

Автоэнкодеры имеют как преимущества, так и недостатки. Они эффективно справляются с задачами выделения скрытых признаков и уменьшения размерности данных, адаптируясь к сложным и многомерным структурам. Также автоэнкодеры гибки в настройке и могут быть адаптированы к различным типам данных, включая текстовые данные, временные ряды и изображения [8].

Основным недостатком автоэнкодеров является их требовательность к объему данных для обучения, так как небольшой объем может привести к плохому усвоению структуры нормальных данных. Также они чувствительны к выбору архитектуры сети и гиперпараметров, что может существенно повлиять на качество реконструкции. Еще одним недостатком является то, что модель может переобучиться, если в обучающем наборе присутствуют аномалии, что снижает точность их обнаружения [8].

Все методы обладают своими особенностями и применимы в разных контекстах в зависимости от структуры данных и целей анализа.

Для сравнения алгоритмов были выбраны следующие критерии:

1) Работает с высокоразмерными данными – этот критерий оценивает способность алгоритма обрабатывать данные с большим количеством признаков. Данный критерий важен для сетевого трафика, поскольку каждый сетевой пакет содержит множество признаков, например, IP-адреса, порты, протоколы, временные метки.

2) Требует задания числа кластеров – этот критерий указывает на необходимость задавать заранее число кластеров. Для сетевого трафика этот критерий важен, поскольку в динамичных сетях невозможно заранее определить количество кластеров, отражающих аномальное поведение.

3) Эффективен для данных с шумом – этот критерий оценивает, насколько устойчив алгоритм к шумовым данным, которые могут искажать результаты анализа. Критерий необходим для сетевого трафика, поскольку в реальных сетевых данных часто присутствуют шумовые элементы, такие как случайные ошибки или незначительные отклонения, которые могут искажать результаты анализа, но не являются аномалиями.

4) Требует большого объема данных – этот критерий показывает, насколько алгоритм зависит от объема данных для качественного обучения и работы. Данный критерий является важным для сетевого трафика, поскольку в реальных условиях могут быть как большие объемы данных для анализа в крупных сетях, так и ограниченные данные в малых сетях, что требует гибкости алгоритма в зависимости от доступных данных.

5) Высокая вычислительная сложность – этот критерий оценивает, сколько вычислительных ресурсов требуется для выполнения алгоритма. Критерий важен для сетевого трафика, поскольку анализ в реальном времени требует минимальной задержки и экономии вычислительных ресурсов

6) Работает с плотными кластерами – этот критерий оценивает способность алгоритма обнаруживать плотные группы данных, которые могут указывать на аномальное поведение. Для сетевого трафика это является важным, поскольку атаки часто проявляются в виде плотных кластеров запросов, которые необходимо выявлять для своевременного обнаружения угроз.

7) Обучается на малых данных – этот критерий показывает, насколько хорошо алгоритм справляется с обучением на небольших выборках данных. Критерий может быть необходимым для сетевого трафика, поскольку в некоторых случаях для анализа могут быть доступны только ограниченные данные, например, при мониторинге новых сетей, где исторический трафик еще не накоплен.

Далее приведена сравнительная таблица, которая отражает ключевые аспекты каждого алгоритма, описанные в тексте.

Таблица

Сравнение алгоритмов обнаружения аномалий

Критерий	Isolation forest	DBSCAN	Autoencoder
Работает с высокоразмерными данными	Да	Нет	Да
Требует задания числа кластеров	Нет	Нет	Нет
Эффективен для данных с шумом	Да	Да	Да
Требует большого объема данных	Нет	Нет	Да
Высокая вычислительная сложность	Нет	Да	Нет
Работает с плотными кластерами	Нет	Да	Нет
Обучается на малых данных	Да	Нет	Нет

Исходя из представленной выше таблицы, можно сделать вывод, что *isolation forest* отлично подходит для задач, где необходимо быстро выявлять аномалии, не заботясь о структуре

данных, но может столкнуться с проблемами при наличии большого объема данных с переменной плотностью. *DBSCAN* лучше всего подходит для кластеризации данных с произвольной формой и эффективно выделяет аномалии, однако его производительность зависит от корректной настройки параметров, таких как радиус и минимальное количество точек в кластере. Автоэнкодеры более требовательны к объему данных и вычислительным ресурсам, но они справляются с обработкой сложных многомерных данных, таких как временные ряды.

Вывод

В ходе работы был проведен сравнительный анализ современных методов обнаружения аномалий в сетевом трафике на основе алгоритмов машинного обучения без учителя. Рассмотрены алгоритмы *isolation forest*, *DBSCAN* и *autoencoder*, выявлены их ключевые особенности, преимущества и недостатки.

Полученные результаты показывают, что ни один из методов не является универсальным решением для задач обнаружения аномалий. Выбор подходящего алгоритма зависит от характера данных, доступных ресурсов и требований конкретной задачи. В некоторых случаях может быть использовано комбинирование методов для повышения точности и устойчивости результатов, однако это требует дополнительных вычислительных ресурсов. Использование машинного обучения без учителя открывает широкие возможности для анализа сетевого трафика и выявления скрытых угроз, особенно в динамичных сетях с высокой степенью изменчивости.

Библиографический список

1. *Самойлов В. Е., Сейченко О. Ю.* Выявление аномалий в трафике корпоративной сети с использованием алгоритмов машинного обучения // Вестник современных цифровых технологий. 2023. № 16. С. 30–40.

2. *Токарев С. А.* Исследование алгоритмов искусственного интеллекта для обнаружения сетевых атак // International Journal of Professional Science. 2023. № 6. С. 177–182.

3. *Трошин А. В.* Обнаружение аномалий трафика сети с помощью методов понижения размерности // Инфокоммуникационные технологии. 2022. Т. 20. № 4. С. 34–43.

4. *Голованов А. А., Мельникова О. И., Деменко К. А.* Выявление аномалий сетевого трафика на примере нейронных сетей // Системный анализ в науке и образовании. 2019. № 2. С. 10–15.

5. *Осьминкин М. Е., Пиневич Е. В., Фисенко К. С.* Алгоритмы машинного обучения // Мировые научные дискуссии в эпоху цифровизации: от теории к практике: Материалы XVI Международной научно-практической конференции. 2023. С. 95–97.

6. *Кечеджиев А. С., Цветкова О. Л.* Исследование обнаружения аномалий с использованием Isolation Forest в машинном обучении // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024. Т. 51. № 1. С. 106–112.

7. *Ву Вьет Тханг.* Ускорение алгоритма кластеризации DBSCAN за счет использовании алгоритма K-means // Информационные технологии. 2016. Т. 22. № 2. С. 109–115.

8. *Сафронов Д. А., Кацер Ю. Д., Зайцев К. С.* Поиск аномалий с помощью автоэнкодеров // International Journal of Open Information Technologies. 2022. Т. 10. № 8. С. 39–45.

УДК 004.853 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-15-21**

Е. М. Бадика*
студент
Д. А. Зырянов*
студент
А. П. Бобрышов*
аспирант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО АССИСТЕНТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ КАЧЕСТВА РАЗМЕТКИ ДАННЫХ

В текущих условиях развития нейросетевых технологий, доступность алгоритмов для работы в создании моделей так же, как и количество данных моделей, довольна широка. Существует множество open source решений, позволяющих быстро найти и предоставить ответ на поставленные задачи. Таким образом, конкурентная борьба в большей степени сводится не к технологиям, а к качеству данных и скорости их получения. В данной статье будет рассмотрен вариант применения искусственного интеллекта в сборе и предобработке данных.
Ключевые слова: *искусственный интеллект, обработка данных, разметка данных, большие данные.*

E. M. Badika*
Student
D. A. Zyryanov*
Student
A. P. Bobryshev*
PhD Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE USE OF A NEURAL NETWORK ASSISTANT TO IMPROVE THE QUALITY OF DATA MARKUP

In the current conditions of the development of neural network technologies, the availability of algorithms for working in creating models, as well as the number of these models, is quite wide. There are many open source solutions that allow you to quickly find and provide an answer to your tasks. Thus, the competition is largely reduced not to technology, but to the quality of data and the speed of their receipt. This article will consider the use of artificial intelligence in data collection and preprocessing.
Keywords: *artificial intelligence, data processing, data markup, big data.*

Развитие искусственного интеллекта (ИИ) привело к широкому выбору моделей, решающих задачи практически любой сложности. С помощью ИИ осуществляется проектирование авиационных двигателей, реализуется модерация контента, открываются новые химические составы, изобретаются лекарства и т. п. С появлением Large Language Model (больших языковых моделей, LLM) решение задач повседневной жизни значительно облегчилось. При помощи текстового запроса люди планируют себе питание, составляют планы тренировок, организуют свой досуг [1]. В IT-сфере используются такие модели для написания простого кода, тем самым ускоряя процесс разработки в разы. Далее появились Visual Language Model (визуально-языковые модели, VLM), способные обрабатывать одновременно текстовый запрос и изображение, что еще больше увеличило возможности применения нейросетей [2]. Большое преимущество подобных моделей заключается в отсутствии необходимости предварительного обучения модели под конкретную задачу, но есть задачи, где все же необходимо использовать тонко настроенные модели. Обычно такие задачи, связанны с кластеризацией, компьютерным зрением, выявлением мошеннических операций и т. п. В таких операциях для создания качественной модели требуется большой объем данных. При этом в условиях высокой конкуренции между компаниями чем больше, качественнее и быстрее будут со-

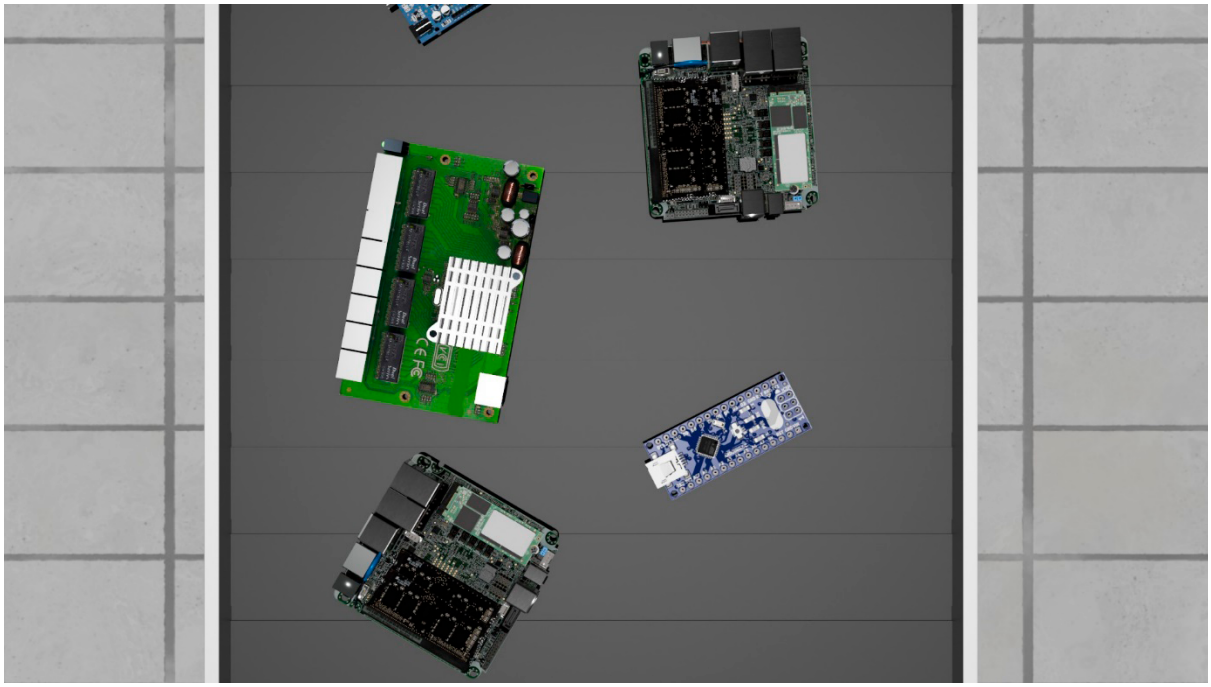


Рис. 1. Пример изображения из датасета плат

бран набор данных, тем лучше получится модель и выше будет преимущество перед конкурентами.

В данной статье будет рассмотрено применение технологий нейросетей в разметке данных на двух задачах, разметка изображений для обнаружения объектов и разметка изображений для электронной коммерции.

В качестве экспериментальной задачи обнаружения объектов будет использоваться операция распознавания плат на конвейерной ленте. Датасет состоит из 600 изображений, пример изображений отображен на рис. 1.

Для разметки изображений будет использоваться сервис roboflow, с функцией разметки при помощи ограничивающих рамок. За 10 мин

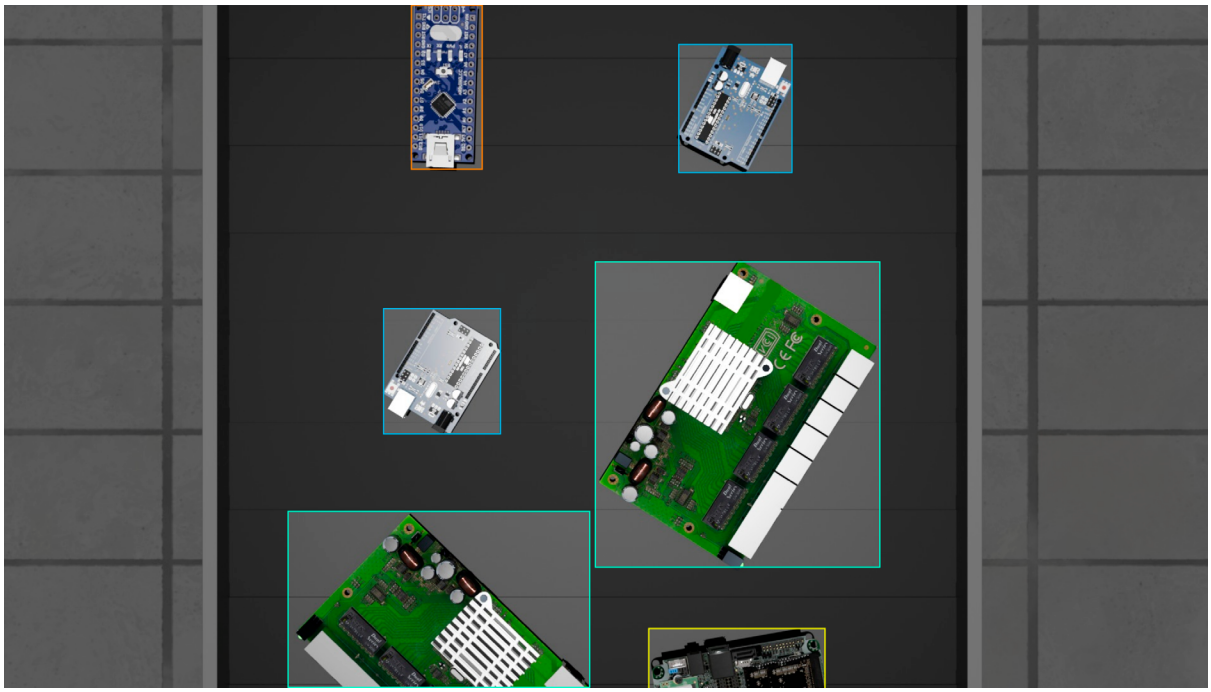


Рис. 2. Пример размеченного изображения

ручной разметки было размечено 11 изображений (рис. 2), следовательно, на разметку всего датасета в ручном режиме будет потрачено 9 ч работы одного человека.

Для обучения нейронной сети YOLOv11 разметим в общей сложности 25 изображений и применим алгоритмы аугментации данных, такие как зеркальные отражения по вертикали и горизонтали, повороты изображения на 90 градусов в обоих направлениях и повороты изображения на случайный угол от 0 до 45 градусов, для получения итогового датасета из 67 изобра-

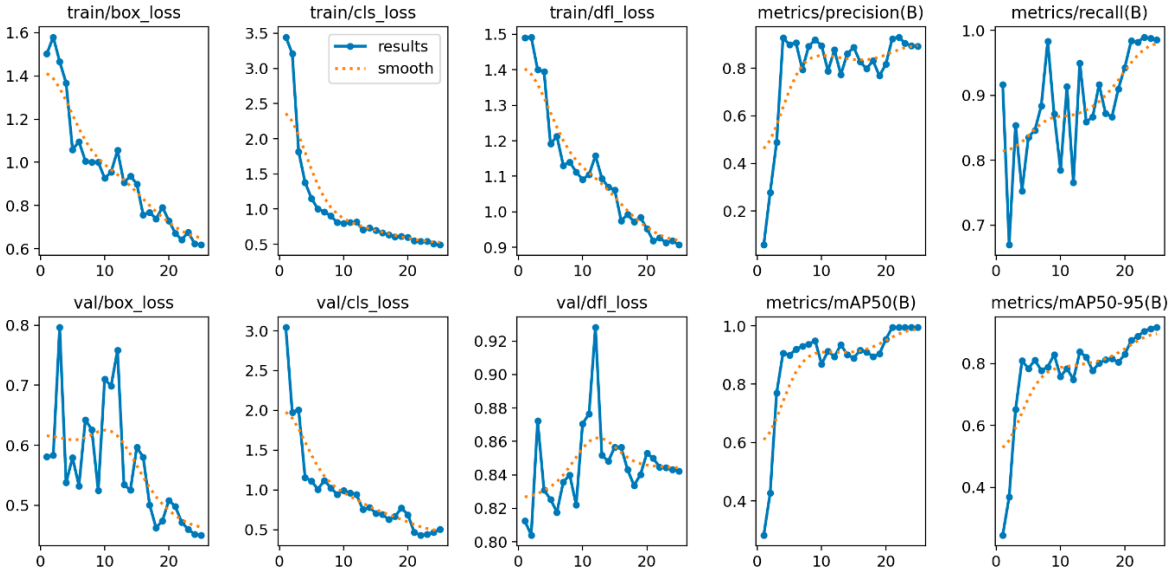


Рис. 3. Результаты обучения модели YOLOv11

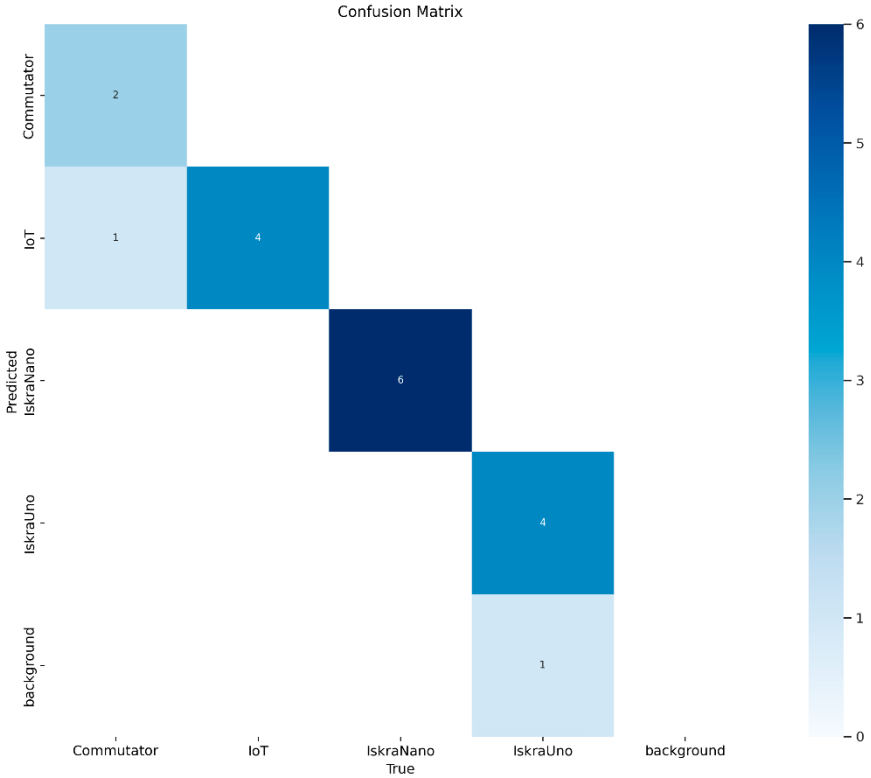


Рис. 4. Матрица несоответствия модели YOLOv11

жений. Итоговый набор данных используем для обучения нейронной сети обнаружения объектов YOLOv11.

В отсутствии большого объема обучающих данных важно не довести модель до состояния переобучения, поэтому будем поводить обучение на 25 эпохах (рис. 3).

На основе рис. 3 можно сделать вывод, что количество эпох подобрано удачно: ошибки классификации и координат объектов падали, полнота и точность модели также выходят *на плато, что свидетельствует о пределе обучения модели на имеющихся данных*. Еще одним важным параметром является матрица несоответствий (рис. 4), согласно которой модель один раз перепутала коммутатор с платой интернета вещей и плату IskraUno с фоном.

Важно понимать, что на данном этапе не так важна точность модели, как само наличие модели, способной каким-либо образом определять требуемые объекты на изображении.

Далее полученная модель загружается обратно в сервис roboflow и подключается к разметке данных. Таким образом модель способна ассистировать человеку в процессе разметки данных. Установим параметр уверенности модели в ответе 50%, значение вероятности предсказанного класса моделью, при котором предсказание модели не будет считаться шумом, и также проведем анализ скорости разметки, где человеку помогает нейронная сеть. В течение 10 мин было размечено 45 изображений, следовательно, на разметку всего датасета будет затрачено 2 ч 12 мин, что в 4 раза сокращает время разметки данных. Оценим матрицу несоответствия нейронной сети при разметке данных (рис. 5).

Как можно заметить на рис. 5, проваливающимся классом является IskraUno, здесь нейросеть больше всего ошибается, однако даже в этом случае модель правильно определила класс в 73% случаев. Оценим балансировку классов обучающей выборки (табл. 1)

Таблица 1

Баланс классов обучающей выборки

Класс	Commutator	IoT	IskraNano	IskraUno
Количество примеров (шт.)	120	82	80	78
Доля в выборке (%)	33,33	22,78	22,22	21,67

Согласно табл. 1, *по доле выборки*, классы достаточно сбалансированы. Также было выявлено 4 случая ошибочной разметки для класса IoT, 4 объекта были приняты за задний фон, что может внести некоторую долю ошибок при разметке данных.

Несмотря на несовершенную балансировку классов в выборке и наличие ошибок в ответах модели удалось достичь общей точности модели по всем классам в 86%. При создании моделей оценка ее качества оценивается индивидуально экспертной оценкой. Для задачи обнаружения и

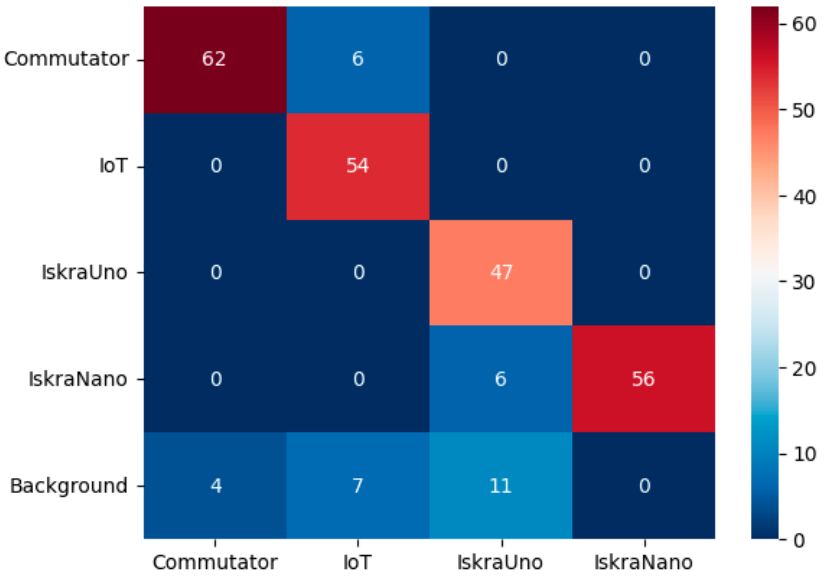


Рис. 5. Матрица несоответствия при разметке данных

классификации похожих объектов можно считать хорошей ту модель, где точность определения класса составляет более 75% [3]. Эти данные свидетельствуют о том, что полученный ассистент разметки в виде модели YOLOv11 имеет высокую точность и успешно справляется с поставленной задачей помощи в разметке по предъявляемым требованиям качества. Также было значительно сокращено время на разметку данных. Полученные результаты разметки можно применять для обучения нейросети, используемой в реальных условиях для решения задачи сортировки объектов.

Проведем опыт с разметкой данных для рекомендательной системы. Воспользуемся датасетом, состоящим из мужской и женской обуви и одежды. Данный набор является распространенным пакетом данных для изучения и обучения нейросетей, внутри находится суммарно 2559 изображений. Распределение по классам представлено в табл. 2.

Таблица 2

Распределение по классам в задача классификации

Класс	Мужская одежда	Женская одежда	Мужская обувь	Женская обувь
Количество примеров (шт.)	657	500	722	680
Доля в выборке (%)	25,67	19,54	28,22	26,57

Согласно табл. 2, классы сбалансированы средне, есть дисбаланс по классу женской одежды.

Задача разметки в таком случае состоит из двух этапов: определение класса обувь или одежда на изображении и определение пола мужская или женская. Для разметки данных будем использовать VLM-модель.

Vision Language Models (VLM) – это уникальные инструменты, предназначенные для эффективной обработки визуальной информации и извлечения из нее лингвистических значений.

Процесс работы VLM можно разделить на несколько этапов:

1. Распознавание и выделение ключевых объектов на изображении.

2. Обработка выделенных объектов визуальным кодировщиком, который преобразует визуальную информацию в формат, понятный для модели.

3. Передача визуальной информации декодеру, который интерпретирует изображение, используя знания предварительно обученной языковой модели.

Обычно VLM обучаются на больших наборах данных, содержащих изображения и соответствующие подписи. Это позволяет моделям изучать взаимосвязь между визуальными элементами и лингвистическими описаниями, что значительно расширяет их возможности.

Структура визуально-лингвистической модели (рис. 6):

1. На вход модели подается текст и изображение

2. Кодировщик изображений преобразует изображение в векторное представление, удобное для обработки нейронной сетью.

3. Кодировщик текста обрабатывает текстовые данные и преобразует их в векторные представления.

4. Мультимодальный интегратор объединяет изображение и текст в единое векторное пространство.

5. Декодер генерирует текст на основе этого мультимодального представления

6. На выход отдается полученный ответ модели [4]

Таким образом, согласно алгоритму работы модели, на вход будет подано изображение из датасета и текстовое описание задачи. На выходе должен быть выведен класс, к которому относится изображение следующим промптом:

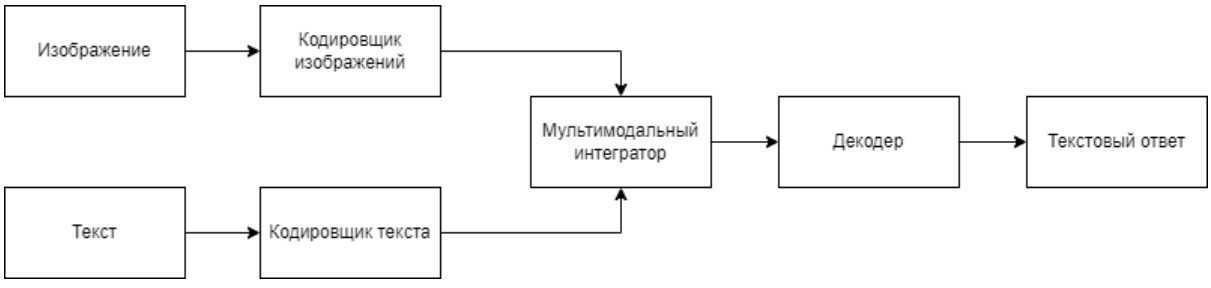


Рис. 6. Структура VLM модели

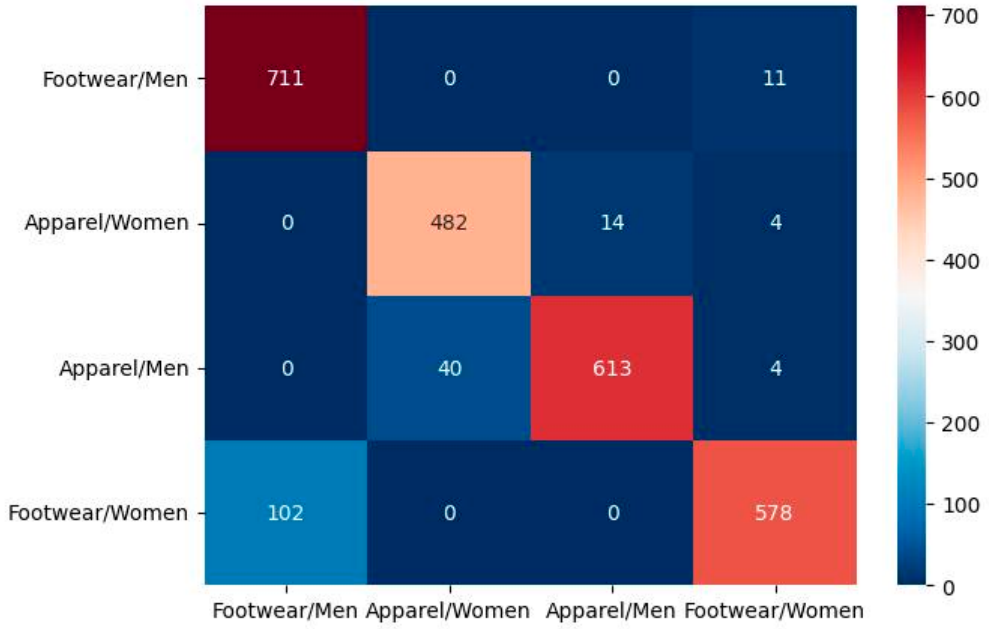


Рис. 7. Матрица несоответствия задачи классификации

«Определи на изображении изображена одежда или обувь, мужская или женская. Доступные категории только мужская и женская, нет деления на универсальную или детскую. Ответ напиши в виде [одежда-мужская], без всяких дополнительных пояснений». Модель разметила все изображения за 3 мин, проведем оценку какое количества изображений за такой же период времени будет размечено вручную. С помощью простой программы будет выводиться на экран изображение для определения класса при помощи клавиатуры. Подключив модуль отсчета времени замерим прошедшее время и прекратим разметку спустя 3 мин. По итогам было размечено 70 изображений, *что в сравнении с предыдущим результатом в 2559 изображений за то же время показывает повышение скорости в 36,5 раз*. Оценим разметку также при помощи матрицы несоответствия (рис. 7).

Как можно заметить, наибольшее несоответствие было на классе женской обуви, которую VLM-модель 102 раза приняла за мужскую. Такое распределение ответов соответствует 85% правильным ответам, что является хорошим показателем. Оценим метрики полноты, точности и f1-меры (табл. 3).

Согласно табл. 3, существуют некоторые провалы в точности определения мужской обуви и полноте определения женской обуви, однако средние и средневзвешенные оценки моделей находятся на уровне 93–94%. Как и в моделях обнаружения объектов, в задачах классификации, качество модели под различные задачи также оценивается индивидуально. Для несложных задач можно принять следующие требования к параметрам, оценивающим модель:

– Средняя оценка точности модели более 90%.
– Точность модели по классам более 85%.
– Полнота по классам более 85%.
– F1-мера более 85% [5].

Согласно приведенным выше критериям, наше качество разметки является высоким и удовлетворяет всем поставленным требованиям к моделям.

Применение искусственного интеллекта в разметке данных является хорошей практикой для ускорения разметки данных с сохранением требуемого качества данных. Данный подход применим в двух случаях:

Таблица 3

Точность, полнота, f1-оценка модели

	Точность, %	Полнота, %	F1-мера, %
Мужская одежда	0,98	0,93	0,95
Женская одежда	0,92	0,96	0,94
Мужская обувь	0,87	0,98	0,93
Женская обувь	0,97	0,85	0,91
Средняя оценка	0,94	0,93	0,93
Средняя взвешенная оценка	0,94	0,93	0,93

1. Когда требуется собрать большое количество данных, требующих значительных трудозатрат при разметке одного примера, как в первой приведенной в работе задаче;

2. Когда требуется обучить более простую модель, направленную на решение одной задачи, например классификации, как вторая задача, приведенная в работе.

В обоих случаях применение искусственного интеллекта в разметке данных сказывается благоприятно и позволяют ускорить разметку данных в 4 или более раз. В дальнейшем, применение больших языковых и мультимодальных моделей, а также моделей компьютерного зрения для разметки данных будет увеличиваться, а задача человека будет уже не в непосредственной разметке данных, а в их контроле и проверке на соответствие качеству.

Библиографический список

1. *Mozharovskii E.* LORA AND QLORA IN LLM FINE-TUNING FOR CUSTOM CODING APPLICATIONS: EFFICIENCY AND SCALABILITY // Холодная наука. 2024. № 8. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/lora-and-qlora-in-llm-fine-tuning-for-custom-coding-applications-efficiency-and-scalability (дата обращения: 14.12.2024).

2. VLM в Нейро: как мы создавали мультимодальную нейросеть для поиска по картинкам. URL: https://habr.com/ru/companies/yandex/articles/847706/ (дата обращения: 14.12.2024).

3. Как оценить качество медицинских нейросетей. URL: https://celsus.ai/blog/kachestvo-nejrosetej/ (дата обращения: 08.12.2024).

4. Понимание языковых моделей зрения и их применение. URL: https://www.ultralytics.com/ru/blog/understanding-vision-language-models-and-their-applications (дата обращения: 14.12.2024).

5. *Горячкин Б. С., Крутов Т. Ю., Галичий Д. А.* Способ оценки достоверности модели компьютерного зрения в системах контроля и управления доступом на основе вероятностного подхода // Наука без границ. 2021. № 5 (57). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sposob-otsenki-dostovernosti-modeli-kompyuternogo-zreniya-v-sistemah-kontrolya-i-upravleniya-dostupom-na-osnove-veroyatnostnogo (дата обращения: 08.12.2024).

УДК 004.056 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-22-24**

С. В. Беззатеев*
доктор технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

КВАНТОВОЗАЩИЩЕННАЯ СИСТЕМА ВЗАИМНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТИ

Рассмотрены протоколы обеспечения квантовозащищенной взаимной аутентификации элементов распределенной сети с различной топологией узлов, обеспечивающих протокол квантового распределения ключей. Также рассмотрены модификации классического протокола квантового распределения ключа BB84 для создания общего ключа для нескольких узлов в различной топологии и использование алгоритма Блома для первоначального распределения ключей элементов распределенной сети.
Ключевые слова: *квантовозащищенная взаимная аутентификация, модификация протокола BB84 на случай нескольких узлов, алгоритм Блома.*

S. V. Bezzateev*
Dr. Sc., Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

QUANTUM-SECURE MUTUAL AUTHENTICATION SYSTEM IN A DISTRIBUTED NETWORK

Protocols for providing quantum-secure mutual authentication of distributed network elements with different topology of nodes providing quantum key distribution protocol are considered. Modifications of the classical protocol of quantum key distribution BB84 for creation of a common key for several nodes in different topology and use of Blom algorithm for initial distribution of keys of distributed network elements are considered.
Keywords: *quantum-safe mutual authentication, modification of the BB84 protocol for the case of multiple nodes, Blom algorithm.*

Введение

Хорошо известный протокол квантового распределения ключа (КРК) BB84[1] позволяет создать общий ключ для двух узлов, непосредственно соединенных квантовым каналом связи. В случае если таких узлов больше двух и необходимо передать некоторую информацию между узлами, не связанными непосредственно друг с другом, предлагается схема создания «связанных» между собой пар ключей, которые необходимо использовать при передаче информации от одного узла к другому. В работе [2] рассматриваются различные схемы таких протоколов для линейной топологии узлов КРК. Однако при этом остается открытым вопрос: каким образом обеспечить КРК для другой топологии, например, типа «звезда», и каким образом эффективно согласовать общий ключ для взаимной аутентификации и шифрования данных для всего множества узлов в такой сети. Кроме того, несомненный интерес представляют схемы, обеспечивающие квантовозащищенную взаимную аутентификацию элементов сети, не имеющих квантового канала связи.

В работе будет рассмотрен вариант модификации протокола BB84, позволяющий создать общий ключ для узлов сети, связанных между собой квантовым каналом при произвольной топологии сети. Также на основе протокола Блома [3] будет предложен алгоритм распределения ключа для элементов сети, не связанных между собой квантовым каналом, обеспечивающий при этом квантовозащищенную взаимную аутентификацию таких узлов при их произвольной топологии.

Модификация протокола квантового распределения ключа для создания общего ключа для нескольких узлов связанных квантовым каналом и имеющим произвольную топологию

Рассмотрим здесь два возможных элемента любой топологии, а именно топологию типа «звезда» и типа «шина». Очевидно, что любая

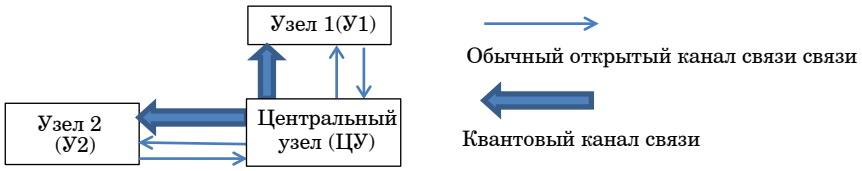


Рис. 1. Элемент топологии «звезда» квантовых каналов

произвольная топология расположения узлов, соединенных квантовым каналом, может быть разбита на такие компоненты, определенным образом соединенные между собой. Для простоты, но без потери общности будем рассматривать такие элементы топологий, состоящие из трех узлов. Совершенно очевидно, что они легко обобщаются на любое число узлов, образующих такие топологические элементы.

Топология «звезда» для трех узлов может быть представлена как на рис. 1.

В стандартном протоколе BB84 ЦУ и У1 по открытому каналу связи согласуют приемник и передатчик квантов, используемые ими при передаче случайных бит по квантовому каналу. Аналогичное действие должны будут выполнить ЦУ и У2. В результате такой процедуры получится два разных парных ключа – для ЦУ и У1 и для ЦУ и У2. Рассмотрим простую модификацию протокола BB*, позволяющую выработать общий ключ для ЦУ, У1 и У2. Будем считать, что ЦУ вырабатывает случайным образом, в соответствии с протоколом BB84 систему сигналов С1 или С2, и так же в соответствии с BB84 случайное значение бит В1, В2 $\in$ {0,1} (В1=0, В2=1). При этом узлы У1 и У2 также случайным образом настраивают свои приемники либо на систему сигналов С1, либо С2. Обозначим соответствующие настройки приемников как П1 и П2. В отличие от стандартной схемы, в данном случае ЦУ генерирует два квантовых сигнала (два кванта / два импульса) с использованием одинаковой системы сигналов и одного значения бита. Соответственно, такие сигналы отправляются по квантовому каналу на У1 и У2.

Приемники узлов У1 и У2 настраиваются случайно и независимо. В дальнейшем, аналогично протоколу BB84 по открытому каналу связи происходит согласование настроек приемника и передатчика квантового канала связи. Однако в этом случае ЦУ выбирает в качестве правильных настроек приемников У1 и У2 лишь те, которые совпадают у этих узлов. Таким образом, в отличие от протокола BB84 для двух узлов, в данном протоколе для получения случайного общего ключа длиной 256 бит потребуется в среднем 1024 сигнала, сгенерированного центральным узлом, вместо 512 сигналов, которые в среднем потребуются для согласования парного ключа между двумя узлами. Очевидно, такая модификация легко обобщается на случай n узлов, связанных с одним центральным узлом по топологии «звезда». В общем случае для формирования общего ключа из 256 бит в таком случае потребуется в среднем передать по квантовому каналу $256 \cdot 2^n$ квантовых сигналов.

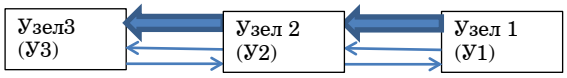


Рис. 2. Элемент топологии «шина» квантовых каналов

Топология «шина» для трех узлов может быть представлена как на рис. 2.

Для генерации общего ключа для представленного элемента топологии «шина» из трех узлов сначала реализуется стандартный протокол создания общего ключа между узлами У1 и У2. Затем реализуется модифицированный протокол BB84 для узлов У2 и У3, в котором по открытому каналу согласуются настройки передатчика узла У2 с приемником узла У3. При этом согласовании, в отличие от стандартного протокола КРК BB84, согласованным считается такая система сигналов С1 или С2, которая не только совпадает с системой приемника П1 или П2, соответственно, но и значение бита, переданное в этой системе, при этом совпадает с уже согласованным битом парного ключа, выработанного на предыдущем шаге между узлами У1 и У2. Аналогично предыдущему случаю легко определить, что для получения общего ключа из 256 бит для трех узлов, соединенных по топологии «шина», потребуется в среднем передать 1024 квантовых сигналов. В общем случае для n узлов, соединенных квантовыми каналами связи по топологии «шина», для получения общего ключа из 256 бит в среднем потребуется использовать $256 \cdot 2^{n-1}$ квантовых сигналов.

Протокол создания ключей для квантовозащищенной взаимной аутентификации элементов, не связанных между собой квантовым каналом

Рассмотрим элемент сети, в котором имеется некоторый узел У1, соединенный квантовым каналом по одной из описанных выше топологий с другими узлами сети и соответственно имеющий некоторый общий для всех узлов квантовой сети ключ К. Будем считать, что на начальном этапе к этому узлу по квантовозащищенному каналу подключено некоторое количество элементов сети {Э11, Э12, …}, которые в дальнейшем должны будут проходить взаимную аутентификацию с другими элементами сети по открытым каналам. Будем считать, что аналогично для второго узла У2 имеются также элементы сети {Э12, Э22, ...} на начальном этапе подключенные по квантовозащищенному каналу. В соответствии с алгоритмом Блома [3] на каждом узле сети создается симметричный многочлен $F(x,y)$, для определения коэффициентов которого используется общий ключ квантовой сети К. Степень такого многочлена выбирается в зависимости от условий использования сети, с учетом всех ее элементов и требований безопасности. Известно[4], что схема Блома теоретико-информационно безопасна в случае компрометации (сговора) не более $\deg F(x,y)$ элементов сети. На каждый элемент Эij узел Уj, к которому на начальном этапе данный элемент подключен, записывает функцию от одной переменной $F_{Эij}(x)$, полученную из общей для сети квантовых узлов функции $F(x,y)$ следующим образом:

$$F_{Эij}(x) = F(x, Эij)$$

Очевидно, что любые два элемента Эij, Эth, первоначально получив свои многочлены $F_{Эij}(x)$, $F_{Эth}(x)$ в общем случае от различных узлов квантовой сети Уj и Уh, могут вычислить парный ключ К{ij,th} для взаимной аутентификации и шифрации данных, обменявшись по открытому каналу информацией о своих идентификаторах Эij, Эth, которая в общем случае не является секретной.

$$К\{ij,th\} = F_{Эij}(Эth) = F_{Эth}(Эij).$$

Следует заметить, что многочлен $F(x,y)$ может выбираться с учетом дополнительных условий, например, блокирование [5] выдачи многочлена $F_{Эij}(x)$ элементу Эij в случае, если этот элемент включен в «черный список».

Заключение

Рассмотрен протокол, позволяющий обеспечить квантовозащищенную аутентификацию и шифрование данных для элементов сети произвольной топологии, узлы которой соединены квантовым каналом, а элементы, первоначально соединенные с узлами квантовозащищенным каналом, в дальнейшем процессе взаимной аутентификации и выработки общего (парного) ключа используют открытый (не защищенный) канал связи.

Библиографический список

1. *Bennett C. H., Brassard G.* Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing (англ.) // ACM SIGACT News. New York City: ACM, SIGACT. 1987. Vol. 18. Iss. 4. P. 51–53.

2. *Жиляев А. Е.* Классификация схем выработки и распределения ключей в сетях квантового распределения ключей произвольной топологии // Доклады ТУСУР. 2021. Том 24. № 4. С. 33–39.

3. *Blom R.* An optimal class of symmetric key generation systems // Proc. Of the EUROCRYPT84 workshop on Advances in cryptology: theory and application of cryptographic techniques. 1985. P. 335–338.

4. *Cheremushkin A. V.* Combinatorial-geometric approaches to design of pre-shared key distribution patterns (review). Prikl.Diskretn.Mat. 2008, 1(1). P. 55–63.

5. *Belim S. V., Belim S. Y.* Modification of Preliminary Blom's Key Distribution Scheme Taking into Account Simplex Channels // Aut. Control Comp. Sci. 2018, 52, 1134–1137.

УДК 004.056 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-25-28**

В. С. Беззатеева*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОВЕДЕНИЯ НЕСОВЕРШЕННОЛЕТНИХ В СЕТИ

Рассмотрен порядок внедрения систем искусственного интеллекта для мониторинга поведения несовершеннолетних, правовое регулирование создания, внедрения и дальнейшего использования таких систем.
Ключевые слова: *права ребенка, защита несовершеннолетних, безопасность несовершеннолетних, информационная безопасность, искусственный интеллект, безопасное интернет-пространство, обеспечение безопасности несовершеннолетних в сети Интернет, соблюдение прав при использовании искусственного интеллекта.*

V. S. Bezzateeva*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO MONITOR MINORS' INTERNET BEHAVIOR

The procedure for implementing Artificial Intelligence systems for monitoring the behavior of minors, legal regulation of the creation, implementation and further use of such systems are considered.
Keywords: *child rights, protection of minors, safety of minors, information security, artificial intelligence, safe Internet space, ensuring the safety of minors on the Internet, observance of rights when using Artificial Intelligence.*

Введение

Искусственный интеллект (ИИ) может отслеживать изменения в поведении несовершеннолетних и предупреждать их родителей или лиц их заменяющих о потенциально опасных ситуациях. Искусственный интеллект также может анализировать посты и сообщения в социальных сетях для выявления возможных ситуаций, которые могут угрожать психическому и физическому здоровью несовершеннолетних для своевременного вмешательства и предотвращения последствий такого воздействия.

Использование нейронных сетей для мониторинга поведения детей и анализа сообщений в социальных сетях представляет собой сложную задачу с точки зрения как технических возможностей, так и правового регулирования. Рассмотрим пошаговый процесс внедрения такой системы и возможные юридические аспекты.

Порядок внедрения мониторинговой системы на основе искусственного интеллекта

1. Первым этапом будет сбор данных, в котором необходимо выделить три основных элемента:

– Необходимо выбрать источники данных, для дальнейшей работы, приведенный перечень не исчерпывающий и может быть дополнен в зависимости от конкретной возрастной категории несовершеннолетних.

Социальные сети: Вконтакте, Likee и другие платформы.

Мессенджеры: WhatsApp, Telegram, Viber и другие приложения.

Электронная почта: Gmail, Mail.ru, Яндекс. Почта и прочие почтовые сервисы.

Школьные системы: Электронные дневники, учебные порталы, электронные библиотеки и медиа-хранилища для обучения.

Приложения для здоровья и фитнеса: статистика сна, физической активности, сердечного ритма.

Игровые платформы: Roblox, Brawl Stars, Minecraft, Scratch, CodeMonkey и другие.

– Далее необходимо произвести интеграцию с источниками, что включает в себя разработку API-интерфесов для подключения к различным платформам, получение доступа к данным через OAuth-протоколы или другие механизмы авторизации и дальнейшее обеспечение регулярного обновления данных через периодическое сканирование аккаунтов.

– И третий элемент заключается в создании защищенной базы данных для хранения собранной информации, применении методов шифрования для защиты персональных данных и в регулярном копировании данных для предотвращения их потери.

2. Вторым этапом является анализ данных, в котором можно выделить также несколько элементов.

– Предварительная обработка данных, которая включает в себя очистку текста от шумовых элементов (эмодзи, хештэгов, ссылок), далее необходимо произвести разметку (токенизацию) текста – разбиение на отдельные слова и фразы и лемматизацию – приведение словоформы к лемме, то есть ее словарной форме.

– ~~Вторым элементом будет~~ применение моделей машинного обучения, что подразумевает использование NLP-моделей для анализа текстов, классификацию эмодзи, мемоджи и анимоджи в сообщениях, выявление ключевых фраз и тем, указывающих на потенциальные риски.

– ~~Третий элемент –~~ применение компьютерного зрения для анализа изображений и видео, поиск признаков агрессии, депрессии и тревожности в визуальных материалах, сравнение текущего контента с предыдущим для выявления изменений в запросах и поведении в целом.

– ~~Последним элементом на данном этапе можно выделить~~ комбинирование результатов анализа текстов, изображений и других данных и оценка общего состояния несовершеннолетнего в зависимости от полученных данных.

3. Третьим этапом будет классификация рисков.

– ~~Включает в себя~~ определение уровней риска, которые можно подразделить на три категории: низкий уровень – незначительные отклонения от нормального поведения; средний – признаки умеренного стресса или беспокойства; высокий – серьезные сигналы тревоги, требующие немедленного вмешательства.

– ~~Далее необходимо~~ установить пороговые значения для каждого из уровней риска на основе статистических данных и экспертных оценок, а также включить возможность настройки индивидуальных параметров для конкретных несовершеннолетних.

– ~~Третий элемент – это~~ автоматическое обновление классификации, заключается в постоянном обучении модели на новых данных для более точной классификации и корректировка пороговых значений в зависимости от изменяющихся условий и контекста.

4. Четвертым этапом необходимо указать уведомление родителей или лиц их заменяющих. Данный этап также может включать несколько элементов.

– Выбор способа уведомления может подразумевать несколько вариантов, такие как SMS-сообщения, push-уведомления в мобильном приложении, электронные письма и звонки в экстренных случаях.

– Форматирование уведомлений: подготовка шаблонов уведомлений для каждого уровня риска, добавление рекомендаций и советов по дальнейшим действиям, предоставление ссылок на дополнительную информацию или ресурсы помощи.

– Автоматическая отправка уведомлений при достижении определенного уровня риска, а также возможность ручного подтверждения отправки уведомлений в случае возникновения критической ситуации.

5. Следующим этапом выступает необходимость разработки рекомендаций родителям или лицам их заменяющих.

– На основе анализа данных формируются индивидуальные советы для каждого несовершеннолетнего. Рекомендации включают предложения по проведению беседы с ребенком, обращению к специалистам, изменению режима дня и так далее.

– Предоставляется перечень контактов психологов, педагогов и социальных служб. Производится подбор онлайн-ресурсов и курсов для повышения осведомленности родителей или лиц их заменяющих.

– Также необходимо организовать обратную связь от родителей – возможность оставить отзыв о полученных рекомендациях и их эффективности. Сбор статистики об использовании ресурсов помощи для дальнейшего улучшения системы.

6. Заключительным этапом является постоянный мониторинг, который включает в себя нижеперечисленные элементы.

– Регулярный сбор данных, который осуществляется из всех доступных источников о обновление информации о поведении и состоянии ребенка.

– Динамическая оценка риска – постоянный пересмотр уровня риска на основании новых данных и автоматическое уведомление родителей о любых изменениях уровня риска.

– Адаптация системы – периодический пересмотр настроек и алгоритмов системы на основе обратной связи от пользователей и усовершенствование работы системы для повышения ее точности и пользы.

Таким образом, внедрение системы мониторинга поведения несовершеннолетних в сети на

основе ИИ включает в себя комплексных подход, начиная со сбора данных и заканчивая предоставлением рекомендаций и постоянного контроля. Этот процесс требует высокого уровня автоматизации, но также необходимо участие человека для принятия окончательных решений и оказания своевременной необходимой помощи.

Правовые аспекты внедрения мониторинговой системы на основе искусственного интеллекта

Для того чтобы внедрить вышеуказанную систему мониторинга, необходима разработка и принятие ряда нормативно-правовых актов, а также внесение изменений в существующую на сегодняшний день законодательную базу Российской Федерации. Можно выделить несколько основных направлений законодательной инициативы.

1. Необходимо усовершенствовать законодательство о защите прав несовершеннолетнего, например, разработать отдельный нормативно-правовой акт, который будет регулировать использование искусственного интеллекта для мониторинга поведения несовершеннолетнего в сети. Такой закон может закреплять ряд положений:

– Цели мониторинга – четкое определение цели использования ИИ-систем, ограничивая их рамками обеспечения информационной безопасности и благополучия несовершеннолетних.

– Ограничение на использование данных – запретить передачу данных третьим лицам без согласия родителей или лиц их заменяющих, кроме случаев, прямо предусмотренных законом (например, при угрозе жизни или здоровью несовершеннолетнего).

– Этика и безопасность – установить высокие стандарты этичности и безопасности при разработке и эксплуатации ИИ-систем, включая обязательное тестирование и сертификацию таких систем перед их запуском.

– Контроль и надзор – создать независимый орган, ответственный за контроль над соблюдением требований закона и рассмотрение жалоб со стороны пользователей.

2. Необходимо внести изменения в закон «Об образовании», чтобы школы и образовательные учреждения могли использовать ИИ-системы для мониторинга поведения учащихся. При этом следует предусмотреть следующие элементы.

– Определить условия, при которых школы могут подключаться к системе мониторинга и передавать данные о несовершеннолетних.

– Обязать образовательные учреждения информировать родителей о возможности участия в программе мониторинга и предоставлять им выбор участия или отказа от него.

– установить правила взаимодействия образовательных учреждений с родителями или лицами их заменяющими и специалистами (психологами, социальными работниками) при обнаружении проблемных ситуаций.

3. Внести дополнения в Федеральный закон от 24 июля 1998 г. N 124-ФЗ «Об основных гарантиях прав ребенка в Российской Федерации» положениями, относительно использования искусственного интеллекта для раннего выявления и предупреждения провокационных и кризисных ситуаций. В частности, необходимо предусмотреть несколько обязательных пунктов.

– Определить процедуры, которые будут применяться в случае выявления высоких рисков для несовершеннолетнего. Например, незамедлительное обращение в социальную службу или правоохранительные органы.

– Возложить обязанность на государственные органы в оказании поддержки семей, где выявлены риски, путем привлечения квалифицированных специалистов (психологи, социальные работники).

– Выделить бюджетные средства на разработку и внедрение ИИ-систем для мониторинга поведения несовершеннолетних в сети, а также на подготовку специалистов, работающих в рамках таких систем.

4. Внести изменения в Федеральный закон от 27 июля 2006 г. N 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации», дополнив его положениями, относительно защиты информации, используемой в системах мониторинга поведения несовершеннолетних.

– Установить требования к обеспечению информационной безопасности систем мониторинга, включая защиту от несанкционированного доступа, утечек данных и кибератак.

– Внести положение об обязательном аудите и сертификации систем мониторинга на соответствие требованиям кибербезопасности.

– Установить административную и уголовную ответственность за нарушение требований защиты и неправомерное использование информации о несовершеннолетних.

5. Также необходимо обеспечить соблюдение конституционных прав человека на непри-

косновенность частной жизни при разработке и использовании ИИ-системы для мониторинга. Гарантировать, что система не нарушает права несовершеннолетнего на личную жизнь и тайну переписки, найти баланс между интересами общества в обеспечении безопасности несовершеннолетних и правом на неприкосновенность частной жизни. Законодательно закрепить обязательное проведение независимой экспертизы проектов ИИ-систем на предмет соблюдения прав человека и гражданина.

6. Учитывая трансграничный характер социальных сетей и сети Интернет в целом, необходимо разработать международно-правовую базу для регулирования использования искусственного интеллекта в целях мониторинга поведения несовершеннолетних. Например, можно заключить двусторонние или многосторонние соглашения с другими странами о сотрудничестве в области защиты информации и мониторинга поведения несовершеннолетних. Привести национальные стандарты в соответствие с международными нормами и стандартами, такими как GDPR в ЕС. Учредить международный орган, отвечающий за координацию усилий по защите прав несовершеннолетних в эпоху цифровизации.

Заключение

Введение ИИ-систем мониторинга поведения несовершеннолетних в сети имеет огромный потенциал для предотвращения кризисных ситуаций и обеспечения безопасности. Однако реализация такого мониторинга требует комплексного подхода к вопросам конфиденциальности, этики и законодательного регулирования. Продуманная и подготовленная реализация таких технологий позволит создать эффективный инструмент поддержки родителей или лиц их заменяющих и защитить несовершеннолетних от потенциальных угроз, обеспечив баланс между безопасностью и уважением прав и свобод человека и гражданина.

Библиографический список

1. *Беззатеева В. С.* Сохранность и защита персональных данных несовершеннолетних в социальных сетях // Научная сессия ГУАП. Гуманитарные науки. 2022. С. 143–144.

2. Искусственный интеллект спасет детей от суицида. URL: https://www.securitylab.ru/news/523402.php (дата обращения: 13.12.2024).

УДК 656.025, 658.7 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-29-32**

Е. Д. Григорьева*
студент
В. А. Ушаков*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ СВОЕВРЕМЕННОЙ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНОТИПНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

В статье выполнена разработка математической модели транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием разнотипных транспортных средств.
Ключевые слова: *математическая модель, транспортная задача, логистика, оптимизация, повышение эффективности, планирование транспортных процессов, своевременная доставка грузов.*

E. D. Grigoreva*
Student
V. A. Ushakov*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR PLANNING TRANSPORT PROCESSES FOR TIMELY DELIVERY OF GOODS USING DIFFERENT TYPES OF VEHICLES

A mathematical model of the transport and logistics problem of timely delivery of goods using various types of vehicles is being developed.
Keywords: *mathematical model, transport problem, logistics, optimization, efficiency improvement, planning of transport processes, timely delivery of goods.*

Введение

В условиях современного рынка логистические процессы играют важную роль в снижении затрат на транспортировку и повышении скорости доставки. Логистика позволяет оптимизировать маршруты доставки. Хорошо налаженные транспортно-логистические процессы позволяют компаниям достичь конкурентного преимущества и повысить эффективность своей деятельности [1–4].

Необходимо решить транспортно-логистическую задачу своевременной доставки грузов с использованием разнотипных транспортных средств (ТС) для компании, занимающейся продажей товаров через интернет-ресурс. Компания имеет свои склады для хранения товаров и выполняет их транспортировку до пунктов выдачи, а также доставляет товары «на дом», используя различные ТС: пеших курьеров, легковые и грузовые автомобили. Целью исследования является повышение эффективности транспортных процессов имеющейся компании в условиях современных городских логистических систем [5, 6].

Математическая модель планирования транспортных процессов своевременной доставки грузов с использованием разнотипных транспортных средств

Для решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием разнотипных ТС необходимо разработать ее математическую модель, которая будет позволять составлять план доставки грузов, распределять грузы по ТС и определять итоговое время доставки каждого груза. Критериями оценки транспортно-логистических процессов будут являться максимизация прибыли от доставки грузов, соблюдение временных интервалов доставки и оптимальное использование

ТС. Также определим исходные данные: информация о грузах, которые необходимо доставить или вернуть на склад; информация о ТС; пункты отправки грузов и пункты доставки грузов.

Для разработки модели введем три бинарные переменные: взаимосвязь груза и ТС (1); взаимосвязь груза, ТС и маршрута (2); взаимосвязь между точками выдачи и доставки груза (3). Переменные принимают значение равное 1, если связь между компонентами системы существует и 0 – если связь отсутствует.

$$x_{ij} \in \{0;1\}, \quad (1)$$

где $i \in \{1,2\ldots,g\}$, g – количество грузов, которые необходимо доставить, $j \in \{1,2\ldots,s\}$; s – количество ТС.

$$y_{ijl} \in \{0;1\}, \quad (2)$$

где $l \in \{1,2\ldots,r\}$, r – количество маршрутов.

$$z_{qh} \in \{0;1\}, \quad (3)$$

где $q \in \{1,2\ldots,o\}$, o – количество пунктов отправки грузов, $h \in \{1,2\ldots,p\}$, p – количество пунктов доставки грузов.

В модели необходимо учесть ограничения, наложенные на систему. Во-первых, каждый груз может перевозить только в одно ТС (4), а также каждый груз везет только одно ТС и только по одному маршруту (5) в рамках одного интервала планирования.

$$\sum_{j=1}^{s} x_{ij} = 1, \quad (4)$$

,

$$\sum_{l=1}^{r} y_{ijl} = 1. \quad (5)$$

Введем ограничения по грузоподъемности и объему грузового отсека ТС (6–7), позволяющие контролировать распределение грузов по ТС и избежать потери грузов.

$$0 \le \sum_{i=1}^{g} m_{g_i} \le M_{S_j}, \quad (6)$$

где m_{g_i} – вес груза, M_{S_j} – грузоподъемность ТС.

$$0 \le \sum_{i=1}^{g} v_{g_i} \le V_{S_j}, \quad (7)$$

где v_{g_i} – объем груза, V_{S_j} – объем грузового отсека ТС.

Также необходимо учесть, что время выдачи груза в пункте доставки не должно превышать времени доставки, обусловленного исходными данными (8).

$$0 \le t_{\text{впути}} \le T_i, \quad (8)$$

где $t_{\text{в пути}}$ – время доставки, T_i – время выдачи груза.

Ограничение по доступным маршрутам (9) запрещает ТС перевозить грузы сразу по нескольким маршрутам в рамках одного интервала планирования.

$$\begin{cases} y_{ijl} = 0, \text{если } r_l \notin R_{S_j} \\ y_{ijl} = 1, \text{если } r_l \in R_{S_j} \end{cases}, \quad (9)$$

где r_l – маршрут для ТС, R_{S_j} – множество маршрутов для ТС.

Для дальнейшей разработки модели необходимо ввести переменную α, которая позволит отслеживать статус груза – этап транспортировки, на котором находится груз в текущий момент времени. Возможные значения переменной представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения статуса груза

Статус	α
На складе	0
В пути	1
Доставлен	2
Возврат на склад	3

На основе информации о грузах и их статусах выполняется определение соотношения по массе и объему грузов для распределения грузов по ТС (10–11).

$$\sum_{\alpha=0}^{3}\sum_{i=1}^{g} m_{\alpha g_i} \le \sum_{j=1}^{s} M_{S_j}; \quad (10)$$

$$\sum_{\alpha=0}^{3}\sum_{i=1}^{g} v_{\alpha g_i} \le \sum_{j=1}^{s} V_{S_j}. \quad (11)$$

Для расчета затрат на транспортировку грузов необходимо получить итоговое время доставки каждого груза (12).

$$t_{\text{в пути}} = \sum_{j=1}^{s}\sum_{l=1}^{r} \frac{R_l}{W_{s_j}} \cdot y_{ijl}, \quad (12)$$

где R_l – дистанция на маршруте для доставки груза ТС, W_{s_j} – средняя скорость движения ТС.

Стоимость перевозки груза (13) складывается из расходов на заработную плату (ЗП) водителю за каждый час работы, стоимость проезда по маршруту (например, если ТС поедет по платным дорогам) и стоимость бензина.

$$A_i = \sum_{j=1}^{s}\sum_{l=1}^{r}\left(\frac{R_l}{W_{s_j}}\cdot Q_{s_j} + H_{r_l} + \frac{R_l D_{r_l}}{100}\right)\cdot y_{ijl}, \quad (13)$$

где Q_{s_j} – стоимость работы водителя, H_{r_l} – стоимость проезда, D_{r_l} – средняя стоимость расхода бензина на 100 км.

Для расчета прибыли от доставки грузов необходимо ввести систему расчета дохода от доставки каждого товара. Пусть компания получает 0,25 от стоимости каждого доставленного в срок товара, однако если сумма дохода от доставки товара меньше 1000 руб., то она приравнивается к 100. Тогда сумма дохода за доставку (14):

$$\begin{cases} \delta_{g_i} = 0{,}25 \cdot C_{g_i}, C_{g_i} > 1000 \\ \delta_{g_i} = 100, C_{g_i} \le 1000 \end{cases}, \quad (14)$$

где C_{g_i} – стоимость товара, 1000 – эталонная стоимость товара, руб.

Также необходимо учитывать штрафы за просрочку товаров, которые рассчитываются по формуле (15) из федерального закона «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд» от 05.04.2013 N 44-ФЗ [7], который устанавливает ответственность в виде неустойки для поставщиков.

$$N = I_{g_i} \cdot \frac{1}{300} \cdot d \cdot 21\%, \quad (15)$$

где I_{g_i} – стоимость товара, 21% – ключевая ставка Центрального банка Российской федерации на 13.12.2024, d – число дней просрочки.

Таким образом, прибыль от доставки (16) груза будет представлять из себя разность между расходами на доставку (ЗП водителя, стоимость проезда, затраты на бензин и штрафы) и доходами от доставки (процент от стоимости товара).

$$B = \delta_{g_i} x_{ij} - A_i - N. \quad (16)$$

Математическая модель должна обеспечивать максимизацию прибыли от доставки грузов с учетом соблюдения временных интервалов доставки и оптимального использование ТС. Следовательно, целевая функция (17) представляет из себя суммарную прибыль от доставки всех грузов и стремится к максимуму:

$$J = \sum_{i=1}^{g} B. \quad (17)$$

Заключение

Разработана математическая модель планирования транспортных процессов своевременной доставки грузов с использованием разнотипных транспортных средств. Были заданы ограничения, накладываемые на переменные целевой функции. Задача планирования транспортных процессов своевременной доставки грузов с использованием разнотипных транспортных средств может быть сведена к многокритериальной задаче линейного программирования [8–10] большой размерности, которая имеет блочно-диагональную структуру матрицы ограничений, которая в свою очередь слабо заполнена.

Библиографический список

1. Академия ДПО. Значимость транспортной логистики. URL: https://academdpo.ru/znachimost-transportnoj-logistiki/ (дата обращения: 30.11.2024).

2. *Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Перспективы использования современных информационных технологий в системах управления транспортно-логистическими сетями // Транспорт России: Проблемы и перспективы–2016: материалы Международной научно-практической конференции (СПб, 29–30 ноября 2016 года). Том 1. СПб: Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, 2016. С. 53–57.

3. Комплексное моделирование и комбинированные методы планирования функционирования железнодорожных составов, входящих в транспортно-логистическую сеть / Б. В. Соколов, С. А. Потрясаев, А. С. Гниденко // Завалишинские чтения-18: сб. докл. (СПб, 16–20 апреля 2018 года). СПб: ГУАП, 2018. С. 99–107.

4. *Белов Ю. Д.* Логистические методы на транспорте: принципы, проблемы, задачи // Научные проблемы водного транспорта. 2008. С. 22–26.

5. Логистика и управление цепями поставок: учебник и практикум для вузов / В. С. Лукинский, В. В. Лукинский, Н. Г. Плетнева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2024. 359 с.

6. *Кирейчева Е. Ю., Поверинов А. И.* Формирование математической модели оценки финансового состояния предприятия // Огарёв-Online. 2016. № 20(85). С. 10–17.

7. Федеральный закон № 44-ФЗ от 5 апреля 2013 г. URL: https://mintrud.gov.ru/docs/laws/116 (дата обращения: 05.12.2024).

8. *Таха Х. А.* Введение в исследование операций / пер. с англ. и ред. А. А. Минько. 7-е изд. М. [и др.]: Вильямс, 2005. 901 с.

9. *Зимин И. Н., Иванилов Ю. П.* Решение задач сетевого планирования сведением их к задачам оптимального управления // Вычислительная математика и математическая физика. 1971. Т. 11. № 3. С. 632–641.

10. *Болтянский В. Г.* Математические методы оптимального управления. М.: Наука, 1969. 408 с.

УДК 621.369.96 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-33-36**

С. В. Дворников*
доктор технических наук, профессор
Д. В. Васильева*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Представлены результаты анализа использования матриц изображений и полученных на их основе гистограмм в задачах поиска объектов на фотоматериалах. Рассмотрены возможности статистических показателей в решении задач идентификации. Демонстрируются результаты оценки контрастности показателей в зависимости от размеров идентифицируемых объектов по отношению к площади обрабатываемых изображений.
Ключевые слова: *распознавание изображений, гистограммы распределения яркости, показатель отношения мощностей элементов гистограмм.*

S. V. Dvornikov*
Dr. Sc., Tech., Professor
D. V. Vasilyeva*
Senior lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SUGGESTIONS FOR CHOOSING THE TYPE OF WAVELET WHEN GENERATING FEATURE VECTORS FROM MULTIPLE-SCALE REPRESENTATIONS OF VIDEO IMAGES

The results of analyzing the use of image matrices and histograms obtained on their basis in tasks of searching objects on photomaterials. The possibilities of statistical indicators in solving identification problems are considered. The results of estimation of contrast of indicators depending on the size of identified objects in relation to the area of processed images are demonstrated.
Keywords: *image recognition, histograms of distribution of brightness, histogram element power ratio index.*

Проблемы поиска объектов на изображениях обусловлены их высокой вариативностью [1]. Особенно ярко указанные проблемы проявляются при обработке фото- и видеоматериалов акваторий мирового океана. [2]. В таких условиях даже применение методов классификации на основе искусственного интеллекта ограничивают размеры обрабатываемого поля изображений в пределах 60–80 тыс. пикселей [3–5]. Поэтому вопросы поиска продуктивных подходов к обработке изображений с целью выявления на них идентифицируемых объектов являются актуальными и имеющими существенное значение, в частности, при решении задач экологического мониторинга и проведении спасательных работ в акваториях мирового океана [6–8]. В интересах решения таких задач проведено исследование, направленное на поиск информативных показателей, используемых при идентификации объектов на обрабатываемых изображениях. В частности, анализировались возможности статистических показателей при обработке изображений до и после внесения в них идентифицируемых объектов. Так, на рис. 1 представлены изображения акватории Черного моря размером 440×350 пикселов формата *.bmp (здесь и далее размеры матрицы в пикселах A = 440, B = 350), до и после внесения в него спасательной шлюпки (далее по тексту – лодка), размером 140×50 пикселов.

Лодка, как введенный объект в изображение акватории моря, представленного на рис. 1, *а*, занимает всего лишь 4,5% от общей площади кадра (рис. 1, *б*), что позволяет рассматривать ее

а) б)

Рис. 1. Акватория моря: а) без лодки; б) с лодкой

как сложно идентифицируемый объект. Учитывая, что в практике распознавания кадров изображений достаточно часто используют гистограммы распределения яркости пикселов [9–10], то они также рассматривались в качестве исходных данных для последующей обработки (рис. 2). Таким образом, исходными данными являлись как матрицы W_0 и W_1, так и сформированные на их основе гистограммы H_0 и H_1 (здесь и далее размеры гистограмм N =256).

В качестве первого показателя, выбранного для оценки результатов обработки изображений, рассматривался показатель амплитудных различий, представляющий собой нормированную разность между матрицами W_0 и W_1 – $\mathrm{Amp}_W(W_0, W_1)$, которую можно вычислить в соответствии с формулой:

$$\mathrm{Amp}_W = \frac{1}{B}\frac{1}{A}\sum_{i=0}^{B-1}\sum_{j=0}^{A-1} |W_{0_{i,j}} - W_{1_{i,j}}|, \qquad (1)$$

где B, A – размеры матриц в пиксалах.

И величину амплитудных различий между элементами гистограмм H_0 и H_1. $\mathrm{Amp}_H(H_0, H_1)$, рассчитываемую в соответствии с выражением:

$$\mathrm{Amp}_H = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1}\sqrt{(H_{0_i} - H_{1_i})^2}, \qquad (2)$$

где N – количество элементов вектора гистограммы.

Проведенные вычисления показали, что $\mathrm{Amp}_W(W_0, W_1)$ и $\mathrm{Amp}_H(H_0, H_1)$ имеют одинаковые значения $\mathrm{Amp}_W(W_0, W_1) = \mathrm{Amp}_H(H_0, H_1) =$ =0,014.

В качестве следующего показателя рассматривался коэффициент корреляции, характеризующий степень похожести сравниваемых величин, в качестве которых выступали соответственно матрицы $\mathrm{Corr}_W(W_0, W_1)$ и гистограммы $\mathrm{Corr}_H(H_0, H_1)$.

Значение коэффициента корреляции рассчитывается в соответствии с выражением:

$$\mathrm{Corr}_W(W_0, W_1) = \frac{\mathrm{Cov}_W(W_0, W_1)}{\mathrm{Disp}_W(W_0)\,\mathrm{Disp}_W(W_1)}, \qquad (3)$$

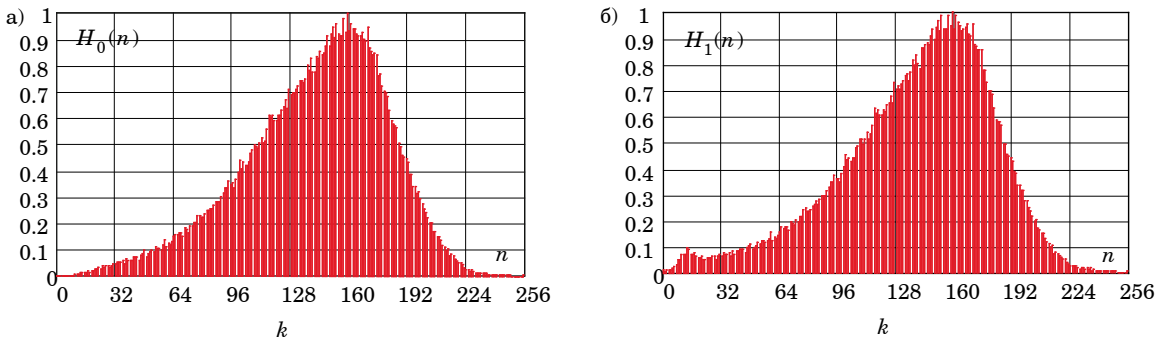


Рис. 2. Гистограмма кадра изображения акватории моря: а) без лодки; б) с лодкой

где $\mathrm{Cov}_W(W_0, W_1)$ – коэффициент ковариации; $\mathrm{Disp}_W(*)$ – величина стандартного отклонения.

В свою очередь коэффициент ковариации рассчитывается как:

$$\mathrm{Cov}_W(W_0, W_1) = \frac{1}{AB} \times$$

$$\times \sum_{i=0}^{A-1} \sum_{j=0}^{B-1} \left[\left(W_{0_{i,j}} - \mathbf{M}[W_0] \right) \right] \times \left[\overline{\left(W_{1_{i,j}} - \mathbf{M}[W_1] \right)} \right]. \quad (4)$$

Здесь $\overline{*}$ – знак комплексного сопряжения матриц; $\mathbf{M}[*]$ – среднее значение матрицы.

Величина стандартного отклонения вычисляется как:

$$\mathrm{Disp}_W(W_{0,1}) =$$

$$= \frac{1}{AB-1} \sum_{i=0}^{A-1} \sum_{j=0}^{B-1} \left[\left(W_{0,1_{i,j}} - \mathbf{M}[W_{0,1}] \right) \right]. \quad (5)$$

Расчет по данному показателю позволил получить следующие значения: при обработке матриц $\mathrm{Corr}_W(W_0, W_1) = 0{,}877$, при обработке гистограмм $\mathrm{Corr}_H(H_0, H_1) = 0{,}999$.

Кроме того, в качестве показателей, которые могли быть использованы при распознавании изображений, рассматривались отношения дисперсий, рассчитываемые в соответствии с формулой (5):

$$K_W = \frac{\mathrm{Disp}(W_0)}{\mathrm{Disp}(W_1)}, \quad K_H = \frac{\mathrm{Disp}(H_0)}{\mathrm{Disp}(H_1)}. \quad (6)$$

По данному показателю лучшую контрастность, т. е. большие различия между обрабатываемыми исходными данными, обеспечил выбор в качестве исходных данных матриц изображений $K_W = 0{,}865$, по отношению к гистограммам $K_H = 0{,}997$. Для окончательного выбора исходных данных для решения задач обработки и распознавания изображений, был предложен обобщенный показатель на основе аддитивной свертки:

$$Э_{W,H} = \mathrm{Amp}_{W,H} + \mathrm{Corr}_{W,H} + K_{W,H}. \quad (7)$$

А в качестве критерия, определяющего окончательный выбор, был предложен максимум показателя суммарной линейной свертки полученных результатов (7).

$$W \underset{\leftarrow}{\overset{\rightarrow}{}} H \Rightarrow \min \left(Э_W \underset{<}{\overset{>}{}} Э_H \right). \quad (8)$$

Проведенные расчеты в соответствии с формулой (7) показали:

$$Э_W = 0{,}014 + 0{,}877 + 0{,}865 = 1{,}756;$$

$$Э_H = 0{,}014 + 0{,}999 + 0{,}997 = 2{,}01.$$

Тогда, согласно критерию (8), выбор коэффициентов матрицы изображений в качестве исходных данных для последующей обработки в интересах решения задач идентификации отображенных на них объектов, видится предпочтительным по отношению сформированным на их основе гистограммам распределения яркости.

В заключение необходимо отметить, что с позиций обработки сигналов, вносимый в изображение объект приводит к изменению структуры результирующего сигнала, и как результат – к изменению соотношения сигнал/шум, который определяется мощностью коэффициентов матрицы фона изображения, не занятого внедренным объектом, к мощности коэффициентов матрицы изображения внедренного объекта [11–13]. Такой подход позволяет ввести понятие взаимного коэффициента отношения сигнал/шум (ОСШ) между исходным изображением и изображением с внедренным объектом $h^2_W(W_0, W_1)$ и, соответственно, $h^2_H(H_0, H_1)$. Очевидно, что показатель будет характеризовать не только исходные размеры внедренного объекта, но и эго энергетический потенциал, т. е. мощность его коэффициентов яркости. В табл. 1 приведены рассчитанные значения $h^2_W(W_0, W_1)$ и $h^2_H(H_0, H_1)$ как функции от линейного увеличения размеров изображение внедренного объекта (коэффициент увеличения линейного размера изображения объекта).

Таблица

Значения взаимного ОСШ изображений в зависимости от размера объекта по отношению к обрабатываемому кадру

K_z	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3
%	4,5	6,99	10,2	13,7	18,6	23,2	28,2	34,8	40,9
h^2_W	17,417	15,434	13,699	12,533	11,317	10,23	9,295	8,517	7,782
h^2_H	26,699	23,488	20,112	17,515	15,05	12,698	10,699	8,964	7,413

Полученные в результате исследования значения h^2W (W_0, W_1) и h^2H (H_0, H_1) позволяют заключить следующее. При незначительных размерах объекта по отношению к площади кадра, до 10%, предпочтительным видится выбор в качестве исходных данных гистограмм (в полтора раза значение ОСШ для гистограмм выше, чем для матриц).

При размерах объекта от 10 до 30% от площади кадра, превышение в контрастности для гистограмм, практически выравнивается. И при дальнейшем увеличении площади, предпочтительным видится использование матриц изображений.

В заключении следует отметить, что преобразование матриц изображений в гистограммы распределения яркости, не всегда оправдано в решениях задач поиска объектов в обрабатываемом фото и видео материале [14].

Представленные результаты подтверждены данными обработки более 200 фотоматериалов, на которых искомый объект занимал площадь кадра в пределах от 4 до 20%, что подтверждается данными исследований, представленных в [15].

Библиографический список

1. *Суровцева И. В.* Технологии дистанционного мониторинга окружающей среды при определенных экстремальных ситуациях // Российский химический журнал. 2020. Т. 64, № 4. С. 97–103. DOI 10.6060/rcj.2020644.14.

2. *Аббасов И. Б.* Современные тенденции мониторинга водной среды прибрежных акваторий // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 1. С. 29–39. DOI 10.22449/2413-5577-2019-1-29-39.

3. Design of an intelligent medication system based on face recognition / B. He [et al.] // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2023. No. 2(69). P. 63–70.

4. *Исхакова А. О., Вольф Д. А., Мещеряков Р. В.* Способ снижения размерности пространства признаков при распознавании речевых эмоций с использованием сверточных нейронных сетей // Автоматика и телемеханика. 2022. № 6. С. 38–52.

5. *Громов Ю. Ю., Ищук И. Н., Родионов В. В.* Применение искусственного интеллекта в задачах обработки данных дистанционного мониторинга // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон». 2023. № 33. С. 727–735. DOI 10.20948/graphicon-2023-727-735.

6. *Васильева Д. В.* Алгоритм обнаружения загрязнений поверхности океана по результатам обработки изображений с систем видеонаблюдения // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2024. № 4. С. 6–16. DOI 10.18127/j20700814-202404-01.

7. *Дворников С. В., Васильева Д. В.* Повышение достоверности выявления аномалий на изображениях при формировании их векторов признаков в базисах вейвлетов // Информатика и автоматизация (Труды СПИИРАН). 2024. Т. 23. № 6. С. 1698–1729. DOI doi.org/10.15622/ia.23.6.5.

8. *Смирнов Ю. Д., Добрынин О. С.* Разработка беспилотных летательных аппаратов для проведения экологического мониторинга // Записки Горного института. 2014. Т. 207. С. 213–216. EDN SGOEBB.

9. *Васильева Д. В., Дворников С. В., Дворников С. С.* Обоснование структуры форматов изображений для решения задач распознавания образов при экологическом мониторинг // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27. № 5. С. 118–128. DOI doi.org/10.32603/1993-8985-2024-27-5-118-128e.

10. *Васильева Д. В.* Исследование чувствительности векторов признаков, сформированных на основе кратномасштабных преобразований обрабатываемых изображений // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27. № 3. С. 20–29. DOI doi.org/10.32603/1993-8985-2024-27-3-20-29.

11. Формирование векторов признаков сигналов из вейвлет-коэффициентов их фреймовых преобразований / С. В. Дворников [и др.] // Информационные технологии. 2013. № 5. С. 46–49.

12. Распознавание сигналов на основе вероятностной оценки дисперсии векторов их признаков / С. В. Дворников [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2020. № 3. С. 81–90.

13. Радиолокационное обнаружение малоразмерных объектов / Д. В. Васильева [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2024. № 1. С. 48–51.

14. *Дворников С. В., Васильева Д. В.* Предложения по выбору вида вейвлета при формировании векторов признаков из кратномасштабных представлений видеоизображений // Завалишинские чтения'24. XIX Международная конференция по электромеханике и робототехнике. Сб. докл. 2024. С. 38–42.

15. *Дворников С. В., Васильева Д. В.* Структуризация первичных признаков изображений систем мониторинга окружающей среды // Радиотехника. 2024. Т. 88. № 8. С. 5–17. DOI: 10.18127/j00338486-202408-01.

УДК 004.056 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-37-40**

Т. Н. Елина*
кандидат экономических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАЩИТЫ ИНТЕЛЛЕКТ-КАРТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ ПОДПИСИ

В статье рассмотрены вопросы организации защиты интеллект-карт с помощью метода электронной цифровой подписи. Такой способ позволит повысить эффективность документооборота предприятия. Обеспечит надежность и безопасность информации, уровень конфиденциальности, целостности и доступности данных. Разработанные алгоритмы обработки данных в спроектированной клиент-серверной информационной системы могут использоваться для обеспечения информационной безопасности любого документооборота.
Ключевые слова: *информационная безопасность, защита информации, электронная цифровая подпись, интеллект-карты.*

T. N. Yelina*
PhD, Economic, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ENSURING PROTECTION OF MIND MAPS USING A DIGITAL SIGNATURE

The article discusses the issues of organizing the protection of mind maps using the method of electronic digital signature. This method will improve the efficiency of the enterprise's document flow. It will ensure the reliability and security of information, the level of confidentiality, integrity and availability of data. The developed data processing algorithms in the designed client-server information system can be used to ensure the information security of any document flow.
Keywords: *information security, information protection, electronic digital signature, mind maps.*

Обеспечение оперативного документооборота является одним из необходимых условий эффективного ведения бизнеса [1] и решения многих других производственных задач. Для достижения этой цели предприятия переходят на электронный документооборот. В настоящее время большая доля российских предприятий перешли от традиционного способа ведения документов к электронному. Такой документооборот подразумевает использование электронной цифровой подписи, что помогает облегчить управление всеми процессами в организации. В нашей стране, в электронном документообороте можно встретить три вида электронной цифровой подписи (ЭЦП): простая, усиленная квалифицированная и усиленная неквалифицированная [2]. Они устроены по-разному, однако в их использовании есть схожие моменты. В данной работе рассмотрены задачи разработки системы для использования ЭЦП для подписи интеллект-карт.

Интеллект-карта – это удобный способ организации информации. Как правило, это хорошо структурированная схема в виде диаграммы с главной идеей или мыслью, от которой расходятся составные ключевые части. Эти части сами могут делиться на подпункты, это продолжается до тех пор, пока информация не будет полностью структурирована [3]. В организациях такое представление информации нередко бывает полезным с точки зрения организации мыслей, идей, задач, результатов мозгового штурма и т. д. К тому же, интеллект-карту легко анализировать визуально, что существенно облегчает восприятие и получение представления об информации, представленной на схеме, что в конечном итоге повышает эффективность работы на предприятии.

Особенность таких файлов в том, что они не являются официальным документом, однако могут содержать информацию, обладающую ценностью. Для подписания таких фай-

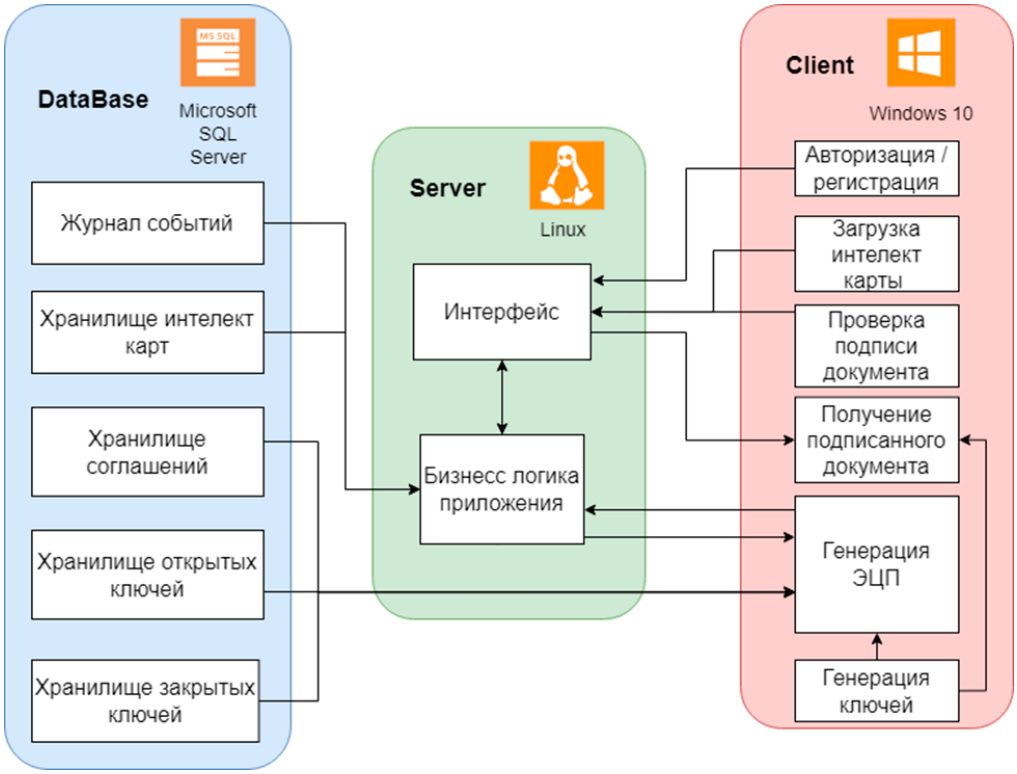


Рис. 1. Архитектура системы

лов наличие квалифицированного сертификата не требуется, но необходимо обеспечить вышеперечисленные функции. Система должна характеризоваться простотой в получении сертификата открытого ключа, поддержкой форматов, характерных для сервисов по созданию интеллект-карт, доступностью.

Для автоматизации процесса подписания документов ЭЦП существует немало программ, однако на данный момент не существует единого решения, которое удовлетворяло бы все необходимые требования по подписанию интеллект-карт, например, обеспечивало защиту с помощью ЭЦП на основе ассиметричных криптографических алгоритмов, что поможет обеспечить неизменность файла с момента подписания и другие функции защиты информации.

В предлагаемой системе реализованы функции подписания интеллект-карт цифровой подписью и их защиты с использованием усиленной неквалифицированной электронной подписи [4].

Первый шаг к созданию усиленной ЭЦП – это генерация пары ключей. Закрытый будет использоваться для шифрования, а открытый, соответственно, необходим для расшифровки. На этом этапе задействованы алгоритмы шифрования, поэтому все операции с ними регулируются стандартами шифрования. Затем происходит подписание нужного файла ЭЦП с помощью закрытого ключа, после чего интеллект-карта готова к участию в документообороте.

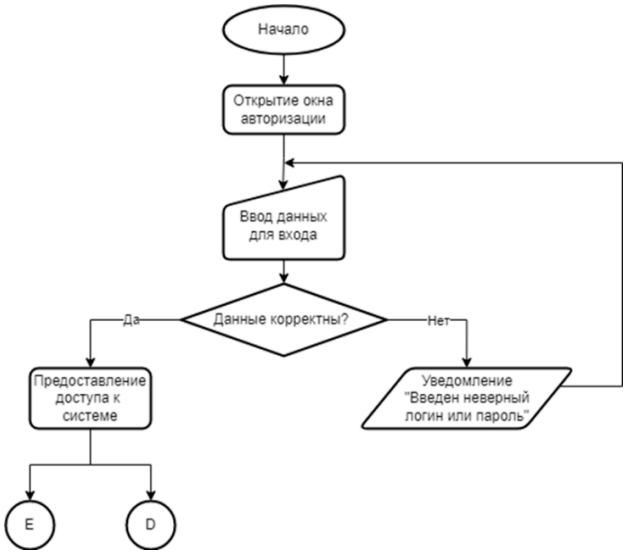


Рис. 2. Блок-схема алгоритма авторизации и начала работы

Подтвердить, что документ был отправлен определенным лицом, не подвергался каким-либо изменениям и т. д., адресат сможет после проверки подлинности подписи. Получив файл интеллект-карты вместе с ЭЦП, а также открытый ключ, пользователь сможет проверить подпись. Система оповещает адресата о результате с помощью уведомления о корректности подписи. И если оба участника электронного документооборота подписали соглашение о взаимном признании подписи, то такая ЭЦП будет иметь юридическую значимость и равносильна подписи от руки.

На рис. 1 представлена клиент-серверная архитектура системы. На стороне «клиента» выполняются следующие операции: авторизация/регистрация, загрузка интеллект карты, проверка подписи документа; получение подписанного документа. Также на стороне клиента из соображений безопасности реализована генерация ЭЦП, которой предшествует создание пары ключей.

Разрабатываемое приложение предполагает в себе такие основные функции, как подписание документа ЭЦП и проверка подписанного документа. В каждом процессе реализована точная настройка и выбор параметров, благодаря чему приложение является достаточно универсальным решением.

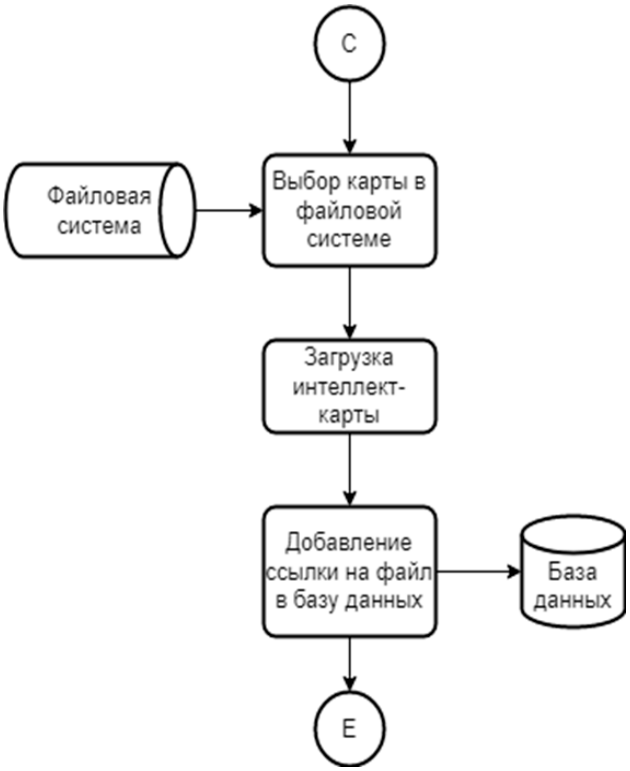


Рис. 4. Блок-схема алгоритма выбора интеллект-карты

Рис. 3. Блок-схема алгоритма подписания

Рассмотрим алгоритм процесса установки подписи на файл интеллект-карты.

Для получения доступа к функционалу программного продукта пользователю предлагается выбор в виде регистрации или входа в уже имеющийся профиль. Сценарий в виде блок-схемы представлен на рис. 2. После чего пользователю будут доступны основные функции программы, а именно подписание документа (рис. 3), выбора интеллект-карты (рис. 4) и проверка подписи (рис. 5).

Таким образом, представленная система предназначена для обеспечения защиты

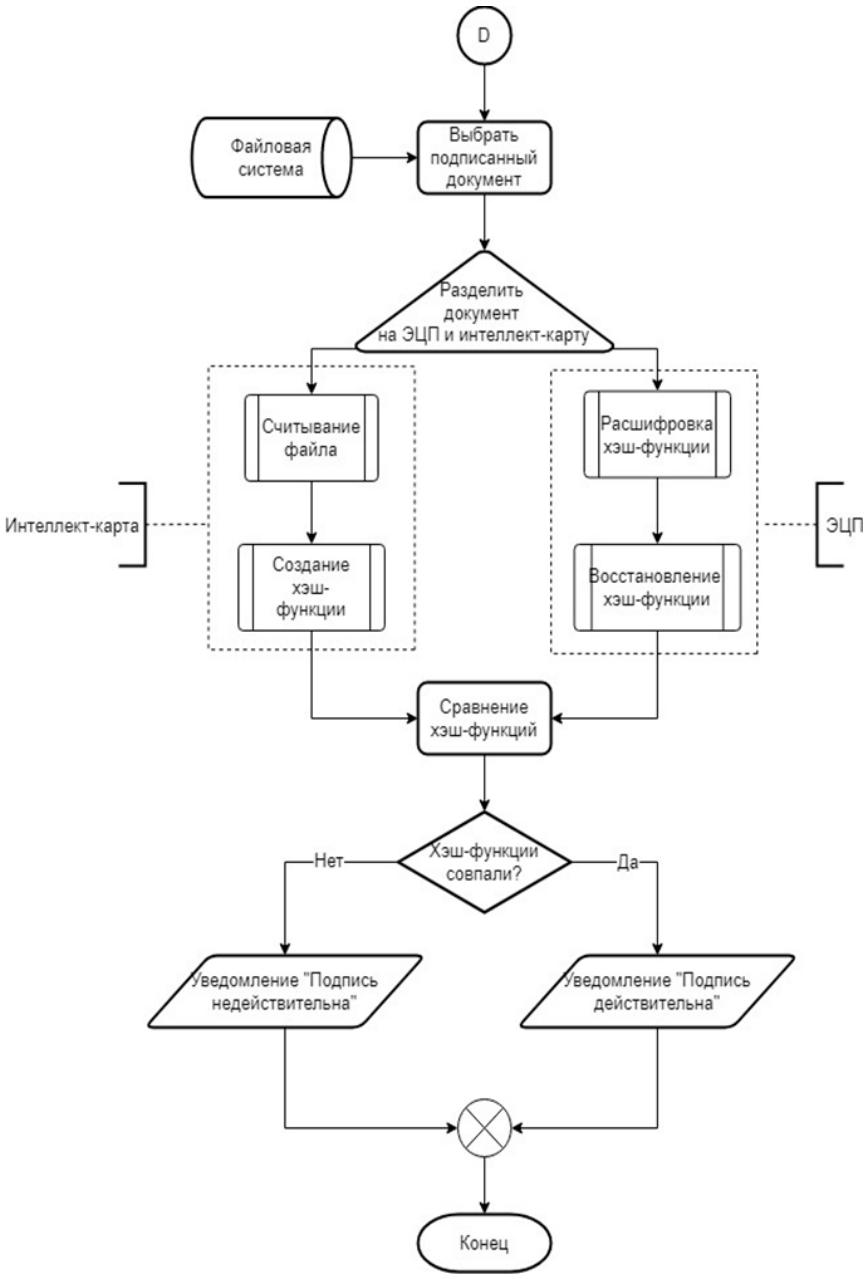


Рис. 5. Блок-схема алгоритма проверки подписи

интеллект-карт с использованием усиленной цифровой подписи. Выбранный тип подписи совмещает удобство и оперативность работы вместе с надежностью, обеспеченной криптографическими алгоритмами.

Библиографический список

1. *Мыльников В. А., Елина Т. Н.* Комплексная оценка эффективности конфигурации информационной системы // Завалишинские чтения 21. XVI Международная конференция по электромеханике и робототехнике. СПб.: ГУАП, 2021. С. 315–318.

2. *Дроздова М. А., Фурсова Е. А., Дроздов В. Г.* Электронная цифровая подпись как важный элемент цифровой бизнес-экосистемы России в условиях индустрии 4.0 // Управленческий учет. 2023. № 7. С. 153–159.

3. *Влазнева Н. С., Яхина-Гимранова Н. И.* Интеллект-карты как эффективный инструмент управления современного менеджера // Наука XXI века: актуальные направления развития. 2020. № 1-1. С. 268–270.

4. Федеральный закон «Об электронной подписи» от 06.04.2011 N 63-ФЗ URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_112701/] (дата обращения: 09.12.2024).

УДК 004.422.81 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-41-43**

Т. Н. Елина*
кандидат экономических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ДОКУМЕНТООБОРОТА ПРИ ВЕДЕНИИ КЛИНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В статье рассмотрены вопросы ведения документооборота при осуществлении клинических исследований. В соответствии с принятыми внутренними и внешними стандартами предлагается универсальный способ организации ведения файла клинических исследований, предложен алгоритм работы с данными. Разработана архитектура системы ведения документооборота в клинических исследованиях. Предложенное решение позволит стандартизировать процессы и повысить их надежность и безопасность.
Ключевые слова: *информационная безопасность, защита информации, клинические исследования, автоматизация.*

T. N. Yelina*
PhD, Economic, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DOCUMENT FLOW SECURITY ISSUES IN CLINICAL TRIALS

The article considers the issues of document flow management in clinical trials. In accordance with the adopted internal and external standards, a universal method for organizing the maintenance of a clinical trial file is proposed, and an algorithm for working with data is proposed. An architecture for the document flow management system in clinical trials has been developed. The proposed solution will standardize processes and increase their reliability and security.
Keywords: *information security, information protection, clinical trials, automation.*

Клиническое исследование можно воспринимать как большой научный эксперимент, который хорошо спланирован, высоко зарегулирован и управляется с применением методов проектного управления. Научный эксперимент предполагает под собой, что данные валидны, а пациенты (субъекты клинических исследований) не страдают и благополучие их здоровья стоит превыше всего.

При проведении клинических исследований подготавливается набор документов, известный как Центральный Файл Исследования (ЦФИ), в соответствии с применимыми международными и местными правилами [1–3]. Центральный Файл Исследования играет ключевую роль в успешном ведении исследования [4]. Документы и данные, хранящиеся в ЦФИ, позволяют наблюдателям, аудиторам и инспекторам оценивать соблюдение протокола, безопасное проведение испытания и качество полученных данных. Качественный ЦФИ имеет решающее значение для обеспечения соблюдения прав пациентов и того, что регулирующие органы имеют доступ к надежным клиническим данным во время подачи заявки на получение разрешения на продажу препарата. Центральный Файл Исследования собирается до начала клинической фазы исследования, во время проведения исследования, после завершения или прекращения исследования и должен храниться в течение длительного периода после исследования для возможной проверки регулирующим органом. Размер и сложность ЦФИ прямо пропорциональны продолжительности и сложности клинического исследования.

Автоматизация ведения ЦФИ и внедрение интегрируемого с другими сервисами компании электронного решения обеспечит управление всеми документами, задачами, этапами и действиями (такими как контрольные визиты и аудиты), которые требуются в ходе клинического исследования. Это также позволит отслеживать прогресс ожидающих, текущих и завершенных действий, исключит избыточность, в том числе дублирование мест хранения и обеспечит прозрачность, целостность и увеличение скорости разработки лекарственного препарата.

На всех этапах клинического исследования создаются различного рода и вида документы, предусмотренные внутренними нормативами, либо другими документами, регламентирующими ход клинических исследований. Все документы, добавляемые в ЦФИ, а это документы, «...созданные перед началом клинической фазы исследования, во время клинической фазы исследования, после завершения или преждевременного прекращения…», должны соответствовать проект-специфичному содержанию ЦФИ и необходимому качеству. Для проверки и исключения влияния человеческого фактора при добавлении документа в ЦФИ, он должен пройти этапы проверки качества, количество которых определяется политикой компании, и только затем будет файлирован в ЦФИ.

Автоматизация ведения ЦФИ позволит достичь следующих результатов:

1) Выработать единый подход к хранению файлов исследования.

2) Увеличить качество контроля по наполнению файлов в исследовании за счет метрик и статусов критичности документов.

3) Сократить время согласования документов за счет единого процесса согласования документов и уведомлений ответственных сторон.

4) Обеспечить принцип документального следа.

Исходя из целей и требований к бизнес-процессам, целесообразным является внедрение в них системы управления корпоративными информационными ресурсами (ECM-систему). Рынок ECM представлен большим количеством решений, основными критериями эффективности которых являются производительность, масштабируемость, отказоустойчивость и функциональная расширяемость платформы. Наилучшими показателями обладает система «OpenText».

Архитектура разрабатываемой системы, представленной на рис. 1, будет состоять из трех основных блоков:

1) Desktop-приложения для клиентского доступа к сетевым ресурсам. Enterprise Connect позволяет организовать доступ к файлам через проводник. Browser предоставляет пользователю доступ к классическому интерфейсу и к smart интерфейсу.

2) Content Server – основное приложение ECM. Имеет монолитную архитектуру с большим количеством логических и функциональных блоков внутри (блок API, блоки ведения пользователей, управление документами, блоки внедряемых модулей).

3) Storage – логический архив, который может содержать в себе сколько угодно точек хранения. Выбранная система управления базами данных – PostgreSQL. Archive Server – масштабируемая и интегрированная служба для эффективного, долгого и безопасного хранения всего корпоративного контента.

Кроме того, система включает модули администрирования системы: Admin Server и OpenText Directory Services, а также дополнительные модули и сервисы Blazon, Brava, Intellijent Capture, eTMF.

Для авторизации пользователей используется OpenText Directory Services 20.4, который интегрируется с Azure Active Directory, для обеспечения автоматического входа пользователей в OpenText с помощью корпоративной учетной записи сотрудника. В качестве СУБД выбраны

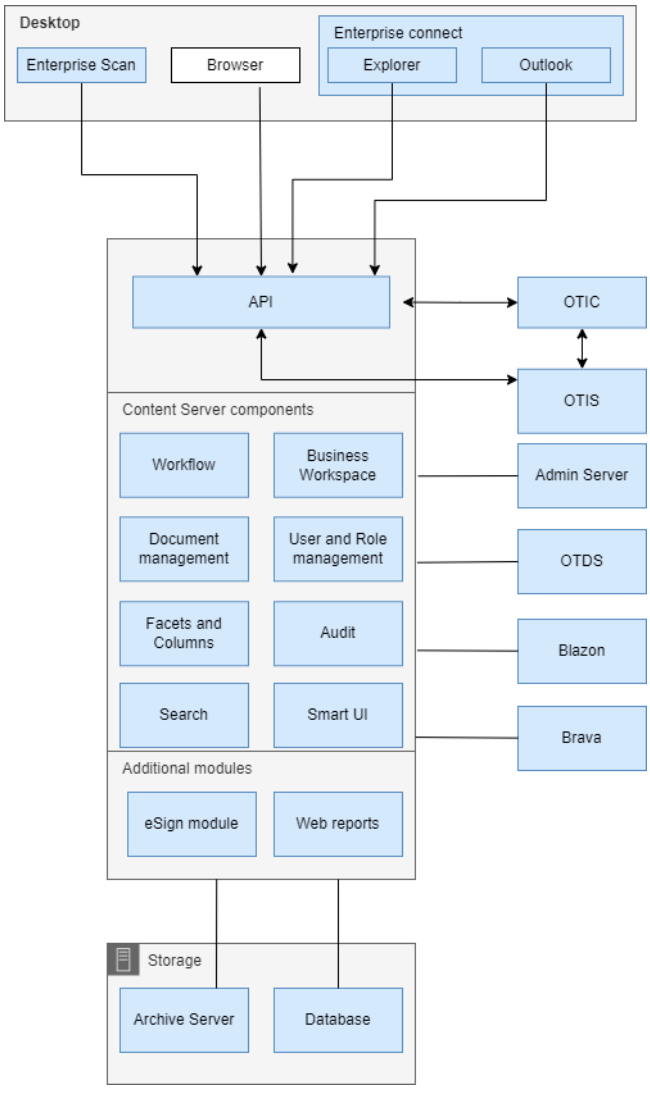


Рис. 1. Архитектура системы

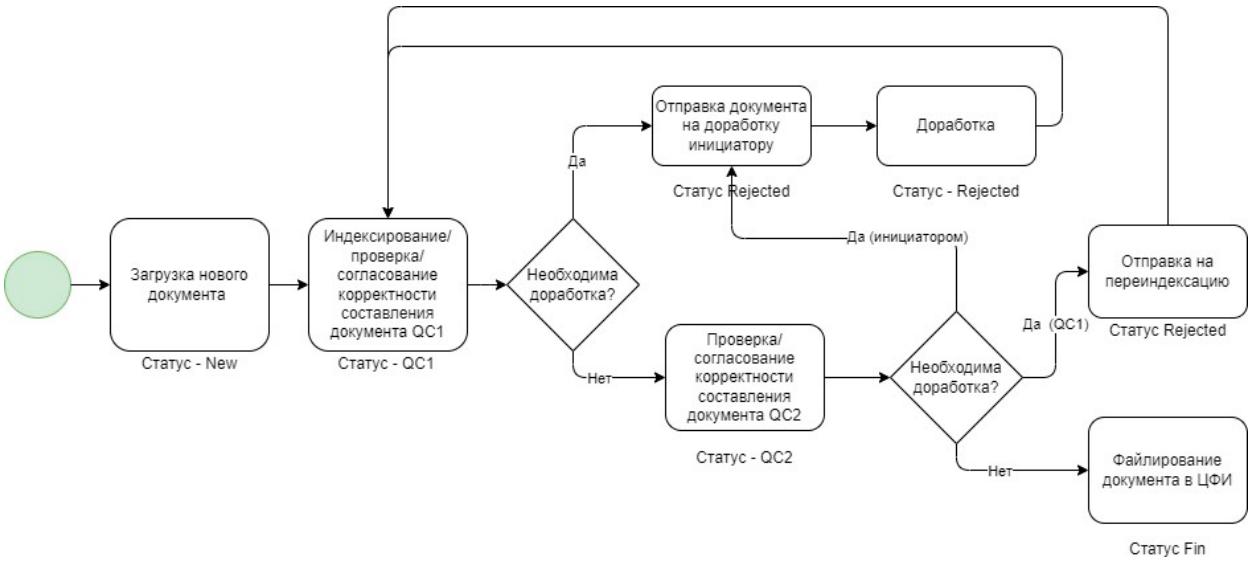


Рис. 2. Добавление документа в ЦФИ

PostgreSQL 11 для Content Server и PostgreSQL 12 для Archive Center.

Структура ЦФИ представлена на трех уровнях:

1) уровень исследования;

2) уровень страны;

3) уровень центра.

На каждом уровне структура папок повторяется. Принадлежащие к отдельному уровню исследования документы относятся к ведению клинических исследований на определенном этапе. Общий сценарий работы со всеми документами в ЦФИ представлен на рис. 2.

Анализ достаточности предложенного решения показал, что разработанная система покрывает все потребности пользователей в хранении и сборе документации [5]. Также в системе были реализованы несколько аналитических отчетов, основанных на множестве LiveReports. Система позволяет использовать их для предоставления информации пользователям, входящим в группу доступа для внутренних пользователей системы (внешние аудиторы не имеют возможности самостоятельно создавать отчеты).

Библиографический список

1. Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61798/ (дата обращения: 15.12.2024).

2. Федеральный закон от 29.07.2004 № 98-ФЗ «О коммерческой тайне». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_48699/ (дата обращения: 15.12.2024).

3. Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ «О персональных данных». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801/ (Дата обращения 15.12.2024);

4. *Вострецова Е. В.* Основы информационной безопасности: учебное пособие для студентов вузов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун- та, 2019. 204 с.

5. *Елина Т. Н.* Ранжирование проектов по формированию комплексной системы защиты информации на предприятии с использованием теории полезности // Завалишинские чтения-23. Сб. докл. XVIII Международной конференции по электромеханике и робототехнике. СПб.: ГУАП, 2023. С. 30–32.

УДК 004.522 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-44-48**

К. М. Коробкин*
студент
В. С. Коломойцев*
кандидат технических наук, доцент
Г. В. Чирков*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕЛ-КЕПСТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ГОЛОСА В СИСТЕМАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ

В работе рассмотрен вопрос применения голосовой идентификации с учетом контекста изменчивости голосовых характеристик и качества предоставляемой для анализа записи голоса. В исследовании использован метод анализа спектральных характеристик с применением мел-кепстральных коэффициентов, который позволяет эффективно извлекать информативные признаки голоса. Описаны методы обработки сигналов, такие как преобразование Фурье и дискретное косинусное преобразование, а также разработан прототип системы идентификации по голосу, использующий предлагаемые методы. Представлены результаты эксперимента по идентификации голоса, основываясь на методе анализа с использованием мел-кепстральных коэффициентов, показана перспективность метода.
Ключевые слова: *голосовая идентификация, биометрические системы, мел-кепстральные коэффициенты, преобразование Фурье, дискретное косинусное преобразование, идентификация личности, акустические характеристики.*

K. M. Korobkin*
Student
V. S. Kolomoitcev*
PhD, Tech., Associate Professor
G. V. Chirkov*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

APPLICATION OF MEL-FREQUENCY CEPSTRAL COEFFICIENT FOR VOICE ANALYSIS IN IDENTIFICATION SYSTEMS

The paper considers addresses the application of voice identification, taking into account the context of variability of voice features and the quality of the voice recording provided for analysis. The study employs a Mel-frequency cepstral coefficient spectral feature analysis method to efficiently extract informative voice features. Signal processing techniques such as Fourier transform and discrete cosine transform are described and a prototype voice identification system using the proposed techniques is developed. Experimental results of voice identification based on the Mel-frequency cepstral coefficient analysis method are presented, and the promising performance of the method is shown.
Keywords: *voice identification, biometric systems, mel-frequency cepstral coefficients, Fourier transform, discrete cosine transform, person identification, acoustic characteristics.*

Введение

Голос – уникальная черта каждого человека, которая, помимо коммуникации, может служить ключом к идентификации личности. Строение голосового аппарата формирует неповторимые характеристики звукового сигнала, отличающие один голос от другого. Благодаря этим особенностям голос давно используется как биометрический идентификатор, который обеспечивает возможность установления личности по акустическим характеристикам.

Развитие информационных технологий открывает новые горизонты для применения голосовой идентификации. Голосовые биометрические системы находят применение в различных сферах: от обеспечения безопасности в банковской и электронной коммерции до кримина-

листики и борьбы с киберпреступностью. Кроме того, они удобны для пользователей, так как не требуют сложного оборудования или активного взаимодействия.

Таким образом, рассмотрим возможные пути реализации методов по распознаванию голосовых сигналов для решения задачи идентификации личности.

Идентификация по голосу

Несмотря на очевидные преимущества, задача идентификации личности по голосу сталкивается с рядом значительных сложностей, связанных с изменчивостью голосовых характеристик и качеством записи.

Существуют два основных подхода к распознаванию голосовых сигналов: дикторозависимые и текстонезависимые методы [1]. Дикторозависимые методы учитывают индивидуальные голосовые характеристики говорящего, что позволяет более точно идентифицировать личность. В таких методах часто используется кепстральный анализ, представляющий собой исследование спектра голосового сигнала, называемого «кепстром». Для реализации идентификации в данной работе был выбран метод анализа спектральных характеристик с использованием мел-кепстральных коэффициентов. Этот выбор обусловлен тем, что метод эффективно извлекает информативные признаки голоса, учитывая его уникальные характеристики [2].

Стоит отметить, что использование данного метода уже применялось в ряде исследований, однако полученные результаты далеки от 100% точности [2, 3]. Это связано с различными факторами, такими как шумовые помехи, вариации в произношении и индивидуальные особенности голосов говорящих. Несмотря на достижения в этой области, существует потенциал для улучшения точности распознавания. В связи с этим исследуем вопрос оптимизации метода идентификации с использованием мелкепстральных коэффициентов для поиска способа повышения эффективности систем распознавания речи.

Построение моделей и методов идентификации по голосу

В ходе исследования были проанализированы научные работы, в которых рассматриваются различные методы обработки и анализа данных [3–5]. В частности, стоит уделить внимание прототипу, предложенному Р. Р. Музафаровой и Н. А. Соловьевой (2021), в котором используется метод городских кварталов и манхэттенское расстояние для решения схожих задач [3]. Метод, предложенный в упомянутой работе, имеет свои ограничения, так как в нем не предусмотрены этапы нормализации сигнала и удаления шумов, что может негативно сказаться на точности идентификации. В связи с этим, в статье мы сосредоточимся на поиске альтернативного подхода, который будет включать использование корреляции Пирсона для оценки взаимосвязи между сигналами, а также применение нормализации и оконной фильтрации для повышения точности и надежности данных. Корреляция Пирсона выбрана для оценки взаимосвязи между сигналами, поскольку она позволяет количественно определить степень линейной зависимости между двумя наборами данных, что критично для анализа голосовых характеристик. Нормализация, в свою очередь, помогает привести амплитуду сигнала к единому диапазону, минимизируя влияние уровней громкости и обеспечивая стабильность последующих вычислений. Оконная фильтрация позволяет сосредоточиться на активных участках сигнала, удаляя шумы и неинформативные фрагменты, что значительно улучшает качество анализа.

Преобразование Фурье было выбрано как метод анализа частотных составляющих сигнала, который позволяет анализировать функции в частотной области, представляя их в виде суперпозиции синусоид и косинусоид разных частот. Для дискретного сигнала длиной N, временных точек с последовательностью значений $x(n)$, где $n = 0,1,...,N-1$, прямое преобразование Фурье может быть вычислено следующим образом:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{\frac{-2n \cdot i \cdot k \cdot n}{n}},$$

где $X(k)$ – спектр сигнала на частоте k.

После получения сигнала проводится нормализация с целью приведения амплитуды сигнала в диапазон от –1 до 1. Это позволяет снизить влияние уровня громкости записи и обеспечить стабильность последующих вычислений, таких как: преобразование Фурье и выделение признаков. Для всех отсчетов сигнала вычисляется максимальное абсолютное значение: $A_{\max} = \max(|A_i|)$, где A_i– амплитуда i-го отсчета.

Приведение всех значений амплитуды к диапазону [–1, 1]: если максимальное значение амплитуды не равно нулю, то все значения сигнала делятся на $A_i^{norm} = \frac{A_i}{A_{\max}}$.

Этот процесс гарантирует, что амплитуда сигнала остается в фиксированном диапазоне, что минимизирует возможные численные ошибки при обработке и улучшает устойчивость алгоритма к изменениям громкости исходной записи.

Для исключения начальных и конечных участков тишины, которые не несут информативной нагрузки, применяется метод на основе порогового значения амплитуды. Процесс состоит из следующих этапов:

1. Определение порогового значения: устанавливается порог T, ниже которого отсчеты сигнала считаются «тишиной».

2. Поиск начала активного участка сигнала: сканируется сигнал с начала к концу. Первый индекс, на котором амплитуда превышает порог $(|A_i|) > T$, считается началом активного участка startIndex.

3. Поиск конца активного участка сигнала: сканируется сигнал с конца к началу. Первый индекс, на котором амплитуда превышает порог $(|A_i|) > T$, считается концом активного участка endIndex.

4. Выделение активного фрагмента: создается новый массив, содержащий только отсчеты между startIndex и endIndex.

Математическая формализация удаления тишины

Пусть $S = \{A_1, A_2, ..., A_N\}$ – сигнал длиной N, тогда индексы активного фрагмента определяются как:

– $startIndex = \min\{i \mid |A_i| > T, i = 1, ..., N\}$;

– $endIndex = \max\{i \mid |A_i| > T, i = 1, ..., N\}$.

Окончательный активный сигнал:

$$S_{active} = \{A_{startIndex}, A_{startIndex+1}, ..., A_{endIndex}\}.$$

Преимущества подхода

1. Эффективность: Удаление тишины выполняется линейным обходом массива, что обеспечивает низкую вычислительную сложность $O(N)$.

2. Универсальность: Метод адаптируется под разный уровень громкости записей, используя относительное пороговое значение.

3. Подготовка для дальнейшей обработки: Удаление тишины позволяет сосредоточиться на анализе полезной информации, уменьшив объем данных и исключив нежелательный шум.

Такая комбинация методов нормализации и удаления тишины является ключевым этапом предобработки в задаче выделения признаков из аудиосигнала, таких как мел-кепстральные коэффициенты.

Далее формируется ряд фильтров, который представляет собой набор полосовых фильтров, спроектированных для извлечения информации из различных частотных диапазонов в сигнале. Определяется минимальная и максимальная частоты, которые будут рассматриваться в мел-шкале (от 0 Гц до половины частоты дискретизации). Эти частоты преобразуются в мел-шкалу с использованием формулы:

$$m = 2595 \cdot \lg(1 + f / 700).$$

Определяется количество фильтров (частотных полос), которые будут созданы. Точки в мел-шкале равномерно распределяются между минимальной и максимальной частотами. После этого каждая точка в мел-шкале обратно преобразуется в герцы с использованием обратной формулы:

$$m = 700 \cdot (10^{m/2595} - 1).$$

Для каждой пары соседних точек создается треугольный фильтр [6]. Каждый фильтр равен нулю за пределами своих двух соседних точек и линейно возрастает (или убывает) внутри этих точек. Комбинируются все треугольные фильтры для формирования гребенки фильтров. Каждый фильтр в гребенке представляет одну полосу частот. Гребенка фильтров помогает преобразовать спектральную информацию сигнала в более удобную форму для анализа, учитывая особенности восприятия звука человеческим слухом, а также позволяет уменьшить количество измерений спектра сигнала [6]. Вместо того чтобы работать с полной информацией о спектре, представленный метод вычисления мел-кепстральных коэффициентов использует эти фильтры для извлечения основных характеристик спектра, что помогает сократить размерность данных и упростить последующий анализ.

Гребенка фильтров применяется к каждому окну сигнала для вычисления энергии в каждой частотной полосе. Это представляет собой процесс оценки силы сигнала в каждом из временных окон, которые прошли через фильтрацию с использованием гребенки фильтров. Энергия окна представляет собой меру активности сигнала в конкретной частотной полосе, отфильтрованной через один из полосовых фильтров. Для каждого окна сигнала вычисляется энергия, объединяя квадраты значений сигнала после применения фильтров. Это делается для каждой из частотных полос, представленных фильтрами. Формула вычисления энергии для каждой полосы фильтра:

$$\sum_{n=0}^{N-1}\left|X(n)\right|^2 \cdot H(n),$$

где N – длина сигнала, $X(n)$ – значение сигнала после применения Фурье на n-ом отсчете, $H(n)$ – коэффициенты фильтрации.

Вычисляется дискретное косинусное преобразование на основе энергии, полученной из гребенки фильтров. С помощью него появляется возможность получить «спектр спектра» преобразуя набор полученных коэффициентов в мел-кепстральные коэффициенты. Существует несколько разных вариантов преобразования в зависимости от периодического продолжения сигнала (от DCT-I до DCT-IV). DCT-II является наиболее распространенным для анализа сигналов в связи с его способностью извлекать частотные характеристики сигнала. Для задачи идентификации человека по голосу подойдет именно II тип, который определяется следующей формулой для k-го коэффициента:

$$C(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \cos\frac{\pi \cdot k(n+0{,}5)}{N}.$$

Набор коэффициентов дискретного косинусного преобразования используется в качестве мел-кепстральных коэффициентов. Эти коэффициенты захватывают основные характеристики звукового сигнала. Получается небольшой набор значений, который успешно заменяет тысячи отсчетов речевого сигнала. Для задачи идентификации пользователя взяты первые 17 коэффициентов. Исследования показывают, что первые 13–20 коэффициентов содержат основную информацию о спектральных характеристиках голоса, что позволяет эффективно различать индивидуальные голосовые особенности [8]. Выбор именно 17 коэффициентов позволяет захватить ключевые аспекты звукового сигнала, минимизируя при этом избыточность данных и улучшая производительность алгоритмов идентификации.

Для сравнения аудиосигналов использованы методы, основанные на Евклидовом расстоянии и корреляции Пирсона. Это позволяет оценить степень схожести между двумя массивами мел-кепстральных коэффициентов. Евклидово расстояние вычисляется как расстояние между двумя точками в многомерном пространстве, где точки – полученные коэффициенты:

$$d(p,q) = \sqrt{\sum_{k=1}^{n}(p_k - q_k)^2}.$$

Тогда как корреляция Пирсона оценивает степень линейной зависимости между двумя наборами данных. Если X_i и Y_i – элементы массивов X и Y соответственно, а $\bar{X}$ и $\bar{Y}$ – средние значения этих массивов, то вычисление коэффициента корреляции Пирсона происходит по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})\cdot(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})^2}}.$$

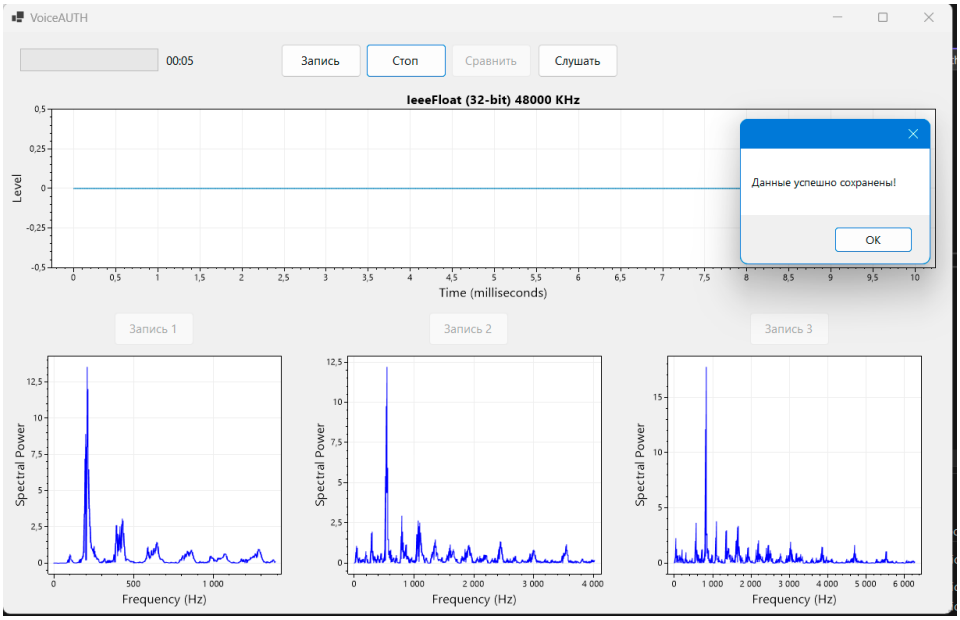


Рис. 1. Интерфейс программы

Применение обоих методов позволяет получить комплексное представление о схожести аудиосигналов. Евклидово расстояние дает абсолютную меру различия между сигналами, тогда как корреляция Пирсона показывает степень их линейной зависимости. Использование этих методов в совокупности улучшает точность идентификации пользователей по голосу, позволяя более точно различать индивидуальные голосовые особенности.

В ходе работы реализован прототип программной системы для практического исследования применимости предложенных методов идентификации людей по голосу. Программа была протестирована в двух режимах: без нормализации сигнала и очищения шумов, а также с использованием методов нормализации и удаления малозначимых фрагментов. Основную роль в повышении точности идентификации и ускорении обработки сигнала сыграл метод нормализации. Интерфейс программы представлен на рис. 1, где показаны основные элементы управления.

Введя необходимую информацию в программу, можно получить результаты, основанные на применении мел-кепстральных коэффициентов. Результаты сравнения показателей вероятности правильного распознавания, в зависимости от режимов работы программы, представлены в таблице.

Таблица

Сравнение вероятности правильной идентификации

Метод	Количество дикторов	Количество тестов	Вероятность верного распознавания, %
Без нормализации	2	20	88
Без нормализации	5	50	85
После применения предложенного метода	2	20	97
После применения предложенного метода	5	50	92

Представленные результаты сравнения вероятности правильной идентификации в различных режимах работы системы наглядно демонстрируют преимущества использования нормализованного и очищенного сигнала для повышения точности идентификации.

Заключение

В ходе исследования были проанализированы методы обработки и анализа аудиосигналов для улучшения идентификации пользователей по голосу. Предложен метод нормализации сигнала и удаления малозначимых фрагментов, который позволяет улучшить точность идентификации. В представленном методе обеспечивается компактное и информативное представление речевого сигнала, что позволяет достигать высокой точности распознавания. Экспериментальные результаты показали, что использование мел-кепстральных коэффициентов успешно справляется с идентификацией человека по голосу, независимо от произносимой пользователем фразы или слова.

Библиографический список

1. *Rabiner L., Juang B.* Fundamental of SpeechRecognition. Englewood Cliffs: Prentice-Hall N.J. 1993. P. 42–65.

2. Majeed, Sayf & HUSAIN, HAFIZAH & Samad, Salina & Idbeaa, Tarik. (2015). Mel frequency cepstral coefficients (Mfcc) feature extraction enhancement in the application of speech recognition: A comparison study. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 79. 38–56.

3. *Санникова А. В., Трушкова У. А., Лялин С. Г.* Исследование мел-частотных кепстральных коэффициентов и их производных при решении задачи голосовой идентификации // Общество. Наука. Инновации (НПК-2018): Сб. ст. XVIII Всероссийской научно-практической конференции: в 3 т. Киров, 02–28 апреля 2018 года. Том 2. Киров: Вятский гос. ун-т, 2018. С. 914–918. EDN XSQEBV.

4. *Иванов И. И.* Анализ метода мел-частотных кепстральных коэффициентов применительно к процедуре голосовой аутентификации // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 10-1. С. 106–114.

5. *Заковряшин А. С., Малинин П. В., Лепендин А. А.* Применение распределений мел-частотных кепстральных коэффициентов для голосовой идентификации личности // Известия АлтГУ. 2014. № 1(81). С. 156–160.

6. *Чесноков М. А.* Применение цифрового гребенчатого фильтра в устройствах шумоподавления речевых сигналов // Информатика, телекоммуникации и управление. 2013. № 5(181).

7. *Huang X., Acero A.* Spoken language processing: a guide to Algorithms and System Development: Prentice Hall, 2001. 1008 p.

8. *Rabiner L., Juang B.*-H. Fundamentals of speech recognition: Prentice-Hall, Inc., 1993. 507 p.

9. *Rabiner L.* Proceedings of the Institute of electrical engineering and radio electronics: vol. 2. M.: Mir, 1989. P. 86–120.

УДК 004.89 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-49-54**

А. Е. Кудряшов*
студент
Д. А. Татжиков*
студент
В. С. Коломойцев*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ КИБЕРСИСТЕМ К АТАКАМ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В статье рассмотрены современные подходы к использованию искусственного интеллекта, в частности нейросетей, для повышения устойчивости информационных систем к угрозам. Особое внимание уделено таким методам, как генерация криптографических ключей с высокой степенью энтропии, обфускация данных, адаптивное шифрование, превентивное обнаружение угроз, а также шифрование на основе генеративных состязательных сетей. Рассмотрены принципы работы указанных методов, преимущества их применения и основные сложности, связанные с реализацией. Описана экспериментальная реализация шифрования данных с использованием генеративных состязательных сетей.
Ключевые слова: *искусственный интеллект, защита информации, криптография, нейросети, генеративные состязательные сети, обфускация данных, адаптивное шифрование, превентивная защита, квантовая стойкость.*

A. E. Kudryashov*
Student
D. A. Tatzhikov*
Student
V. S. Kolomoitcev*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

METHODS OF INCREASING THE RESISTANCE OF CYBERSYSTEMS TO ATTACKS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

This article discusses modern approaches to the use of artificial intelligence, in particular neural networks, to increase the resilience of information systems to threats. Special attention is paid to such methods as generation of cryptographic keys with a high degree of entropy, data obfuscation, adaptive encryption, preventive threat detection, as well as encryption based on generative adversarial networks. The principles of operation of these methods, the advantages of their application and the main difficulties associated with implementation are considered. An experimental implementation of data encryption using generative adversarial networks is described.
Keywords: *artificial intelligence, information security, cryptography, neural networks, generative adversarial networks, data obfuscation, adaptive encryption, preventive protection, quantum durability.*

Введение

Существующие информационные системы подвержены множеству угроз, включая попытки взлома, утечку данных и целенаправленные атаки на критическую инфраструктуру. Эти угрозы становятся все более изощренными, благодаря использованию технологий искусственного интеллекта самими злоумышленниками. Традиционные методы защиты, такие как шифрование и сигнатурное обнаружение угроз, зачастую оказываются недостаточными. Поэтому важно разрабатывать адаптивные и интеллектуальные решения, которые могут позволить противостоять этим вызовам.

Современные технологии обработки данных открывают новые горизонты для защиты информации. Одной из наиболее многообещающих областей может стать применение нейросетей для разработки и управления криптографическими системами. Нейросети обладают уникальной способностью находить сложные зави-

симости и адаптироваться к различным условиям, что делает их незаменимым инструментом в области информационной безопасности.

Нейросети обладают рядом уникальных свойств, таких как способность к обучению на больших массивах данных, адаптация к новым угрозам и выявление сложных зависимостей. Эти особенности делают их перспективным инструментом для защиты киберсистем. Однако их внедрение требует решения ряда проблем, включая вычислительную сложность, настройку моделей под специфические задачи и обеспечение устойчивости к специализированным атакам.

В работе рассмотрены основные подходы и методы использования нейросетей для повышения защищенности информационных систем. Обсуждение охватывает как разработку криптографических ключей, так и методы обнаружения угроз в режиме реального времени.

Методы на основе искусственного интеллекта

Рассмотрим несколько подходов и методов использования искусственного интеллекта в контексте повышения защищенности информационных систем.

Генерация криптографических ключей. Одним из ключевых направлений применения нейросетей может стать генерация криптографических ключей [1]. В отличие от традиционных методов, где ключи создаются случайными генераторами, нейросети способны обучаться на огромных массивах случайных и подготовленных данных, формируя ключи с высокой степенью энтропии. Эти ключи обладают уникальными свойствами – они сложны для прогнозирования и могут адаптироваться к входным данным. Такой динамический подход делает процесс подбора ключей крайне сложным даже для атак, использующих мощные по производительности атакующие системы.

Нейросеть обучается на случайных данных для создания ключей с высокой энтропией, что делает их практически непредсказуемыми. Система может адаптивно генерировать ключи в зависимости от специфики входных данных, что значительно усложняет их подбор злоумышленниками. Динамический подход позволяет использовать свежесгенерированные ключи для каждого сеанса, минимизируя риск повторного использования. Однако одним из недостатков метода является сложность верификации сгенерированных ключей на наличие уязвимостей и высокая зависимость от качества обучающих данных, которые могут вносить предсказуемость в процесс генерации.

Обфускация данных. Перспективным методом может быть обфускация данных [2]. Здесь нейросети используются для преобразования информации в скрытую форму, доступную для дешифрования только с использованием заранее обученной модели. Например, автоэнкодер преобразует исходное сообщение в зашифрованное состояние, передающееся по каналу связи. Без доступа к обученному декодеру эти данные остаются бесполезным набором символов. Такой подход особенно ценен в системах, где важна высокая степень конфиденциальности, и традиционные методы шифрования могут быть недостаточно гибкими.

Принцип работы при использовании указанного метода будет включать следующие этапы:

1. Исходное сообщение проходит через автоэнкодер, где оно преобразуется в компактное и скрытое представление.

2. Полученное преобразованное сообщение передается получателю.

3. Для восстановления данных используется обученный декодер.

Это, в свою очередь, приводит к некоторым положительным результатам, а именно:

– даже если данные будут перехвачены, без доступа к архитектуре декодера и обученным весам они остаются бесполезными.

– такой подход может быть легко интегрирован в системы с высоким уровнем секретности.

Уязвимость такого подхода заключается в риске компрометации обученных весов декодера, что может привести к раскрытию всех обфусцированных данных. Также создание и обучение модели требует значительных вычислительных ресурсов.

Адаптивное шифрование. Нейросети также находят применение в адаптивном шифровании. Анализируя данные, они способны выбирать оптимальные алгоритмы защиты, учитывая тип и объем информации [3]. Например, текстовые данные могут обрабатываться рекуррентными сетями, которые подбирают необходимый уровень защиты. В то же время, нейросеть оптимизирует размер шифра, обеспечивая эффективность без ущерба для безопасности. Этот подход позволяет использовать ресурсы рационально (оптимизировать), что особенно важно для мобильных устройств и систем с ограниченными вычислительными возможностями.

Примерами использования такого подхода могут являться: рекуррентные нейросети

(RNN) или трансформеры (анализируют текстовые данные, выбирая оптимальный алгоритм шифрования); система может адаптировать размер шифра для повышения эффективности, сохраняя при этом необходимую стойкость; в процессе шифрования нейросеть автоматически обнаруживает и устраняет уязвимости.

Тем не менее, система может быть уязвима к целевым атакам, направленным на анализ поведения нейросети, а процесс адаптации может потребовать дополнительных вычислительных затрат.

Квантовая стойкость. Нейросети также могут позволить решить проблемы в обеспечении защиты от будущих угроз, таких которые могут иметь квантовые компьютеры. Традиционные алгоритмы шифрования, такие как: RSA/AES/Blowfish/ГОСТ, могут быть уязвимы перед квантовыми атаками. Однако нейросети способны находить преобразования данных, которые невозможно расшифровать с помощью квантовых алгоритмов. Например, многомерные нелинейные зависимости, обнаруживаемые нейросетями, оказываются слишком сложными для эффективного решения методами, доступными квантовым вычислительным системам. Иными словами, нейросети обучаются находить сложные многомерные преобразования данных, которые не поддаются декодированию с помощью квантовых алгоритмов, таких, например, как алгоритм Шора. Это может позволить создавать гибридные системы, которые сочетают традиционные криптографические методы с нейросетевыми подходами для обеспечения максимальной защиты.

На текущем этапе развития квантовых вычислений оценка реальной стойкости подобных решений ограничена, а разработка таких систем требует значительных теоретических исследований и экспериментов.

Превентивная защита от угроз и атак. Помимо создания и применения криптографических методов, нейросети могут демонстрировать неплохие результаты в обнаружении угроз и атак [4]. Нейросети анализируют сетевой трафик в режиме реального времени, метаданные и процессы дешифровки, выявляя подозрительные паттерны. Благодаря способности обучаться на реальных и синтетических данных, нейросети распознают даже нетривиальные попытки взлома. Это позволяет выявлять угрозы информационной безопасности на ранних стадиях с довольно высокой скоростью, минимизируя потенциальный ущерб. Однако ложноположительные срабатывания могут создавать дополнительные проблемы, включая блокировку легитимных операций. Кроме того, обучение модели на некорректных данных может снизить ее эффективность в распознавании атак.

Шифрование на основе GAN. Одним из подходов, которые могут иметь особое внимания и необходимость рассмотрения, может являться использование генеративных состязательных сетей (GAN) [5]. Эти сети состоят из двух частей – генератора и дискриминатора, которые работают в режиме состязания. Генератор создает зашифрованные данные, а дискриминатор пытается их расшифровать. В процессе обучения создается устойчивая система шифрования, которая постоянно улучшает свою стойкость. Такой подход не только сложен для взлома, но и может адаптироваться к новым угрозам.

Таким образом, механизм подхода сводится к достаточно простым положениям:

– Генератор шифрует данные, стремясь сделать их неузнаваемыми.

– Дискриминатор пытается расшифровать данные, совершенствуя свои алгоритмы.

– В процессе обучения создается устойчивая схема шифрования, сложная для взлома даже специализированными методами.

Это позволяет получить постоянное улучшение устойчивости системы благодаря процессу состязания, а также процесс создание динамичных ключей шифрования, недоступных для подбора.

Среди перечисленных методов особое внимание заслуживает использование генеративных состязательных сетей (GAN). Эти сети открывают принципиально новые возможности в области шифрования, благодаря способности обучаться созданию устойчивых к атакам систем. GAN не только обеспечивают высокий уровень защиты данных, но и адаптируются к изменяющимся угрозам, что делает их особенно перспективным инструментом в области криптографии.

Рассмотрим более подробно принцип работы GAN и представим принцип шифрования, на основе него, на практике.

Принципы работы генеративных состязательных сетей в криптографии

Генеративные состязательные сети созданы как инструмент для генерации высококачественных изображений и текстов. Однако они, также, нашли применение в области криптографии и защиты данных. В криптографическом контексте GAN адаптируются следующим образом:

– **Генератор** берет входные данные, такие как текст, файл или изображение, и преобразует их в зашифрованную форму. Он обучается создавать такие преобразования, которые будет крайне сложно расшифровать даже дискриминатору.

– **Дискриминатор** пытается отличить зашифрованные данные от оригинальных или дешифровать их. Его задача – «раскрыть» информацию, созданную генератором.

Оба компонента обучаются одновременно: генератор стремится создавать все более устойчивое шифрование, а дискриминатор – эффективнее расшифровывать или находить слабые места генератора. Этот процесс напоминает эволюционное соревнование, где каждая из сторон постоянно совершенствуется, что приводит к созданию сложных и устойчивых схем шифрования.

Генератор может использовать случайный вектор (ключ), определяющий способ шифрования данных. Без доступа к этому ключу дешифровка становится практически невозможной. Нейросеть-генератор обучается таким образом, чтобы даже минимальные изменения ключа кардинально меняли зашифрованное сообщение. Это обеспечивает высокий уровень безопасности и уникальность каждого сеанса шифрования.

Генеративные состязательные сети способны адаптироваться к типу данных, выбирая наиболее эффективные способы шифрования. Например, для текстовой информации они могут применять одну схему преобразований, а для мультимедиа – другую. Такой подход повышает устойчивость системы к атакам, поскольку структура зашифрованных данных становится непредсказуемой.

Благодаря постоянному совершенствованию дискриминатора, система автоматически выявляет и устраняет уязвимости. Это делает шифрование на основе GAN гораздо сложнее для анализа и взлома, чем традиционные методы, где алгоритмы фиксированы. потенциал технологии огромен. GAN открывают путь к созданию самоадаптирующихся криптографических

```
Real Data Batch: tensor([[ 8,  5, 12, 12, 15, 27, 23, 15, 18, 12,  4,  0,  0,  0
,  0]])
Fake Data Batch (raw): tensor([[ 8,  5, 12,  0, 12, 15, 27, 23, 15, 18, 18, 12,
12,  4,  4]])
Исходный текст: hello world
Расшифрованный текст: hello worrlldd
--------------------------------------------------------------------------------
Epoch [1900/5000] | D Loss: 0.6522 | G Loss: 1.7403
Real Data Batch: tensor([[ 8,  5, 12, 12, 15, 27, 23, 15, 18, 12,  4,  0,  0,  0
,  0]])
Fake Data Batch (raw): tensor([[ 8,  5, 12,  0, 12, 15, 27, 23, 15, 18, 18, 12,
12,  4,  4]])
Исходный текст: hello world
Расшифрованный текст: hello worrlldd
--------------------------------------------------------------------------------
Epoch [2000/5000] | D Loss: 0.6542 | G Loss: 2.1042
Real Data Batch: tensor([[ 8,  5, 12, 12, 15, 27, 23, 15, 18, 12,  4,  0,  0,  0
,  0]])
Fake Data Batch (raw): tensor([[ 8,  5, 12,  0, 12, 15, 27, 23, 15, 18, 18, 12,
12,  4,  4]])
Исходный текст: hello world
Расшифрованный текст: hello worrlldd
--------------------------------------------------------------------------------
Epoch [2100/5000] | D Loss: 0.6503 | G Loss: 2.0986
Real Data Batch: tensor([[ 8,  5, 12, 12, 15, 27, 23, 15, 18, 12,  4,  0,  0,  0
,  0]])
Fake Data Batch (raw): tensor([[ 8,  5, 12,  0, 12, 15, 27, 23, 15, 18, 18, 12,
12,  4,  4]])
Исходный текст: hello world
Расшифрованный текст: hello worrlldd
--------------------------------------------------------------------------------
Epoch [2200/5000] | D Loss: 0.6520 | G Loss: 2.3322
Real Data Batch: tensor([[ 8,  5, 12, 12, 15, 27, 23, 15, 18, 12,  4,  0,  0,  0
,  0]])
Fake Data Batch (raw): tensor([[ 8,  5, 12,  0, 12, 15, 27, 23, 15, 18, 18, 12,
12,  4,  4]])
Исходный текст: hello world
Расшифрованный текст: hello worrlldd
--------------------------------------------------------------------------------
```

Рис. 1. Программа генерации данных, на основе GAN и LSTM

систем, которые способны справляться с угрозами будущего, включая атаки с использованием квантовых вычислений [6].

Пример реализации и работы, представленного подхода можно представить в виде программы. Программа представляет собой генеративно-состязательную сеть с использованием LSTM для генерации текстовых данных. Алфавит может состоять из символов английского языка и пробелов, строки ограничены длиной в 15 символов с добавлением padding для коротких строк.

Результаты работы программы можно наблюдать на рис. 1.

Принцип работы таков: генератор преобразует случайный шум в текст, используя слои Embedding, LSTM и LogSoftmax, а также функцию потерь CTC для сохранения смысловой близости текста. Дискриминатор проверяет, являются ли данные реальными или сгенерированными, используя линейные слои, активацию ReLU и финальный слой Sigmoid.

Текстовые данные предварительно преобразуются в числовой формат, а затем подаются в DataLoader для деления датасета на меньшие части (формирования батчей). Во время обучения генератор создает ложные данные, а дискриминатор сравнивает их с реальными. Потери дискриминатора обновляются для улучшения точности классификации, а генератор обучается обманывать дискриминатор и приближать сгенерированный текст к реальному. В начале обучения тексты генератора выглядят случайными, но со временем становятся более осмысленными.

Заключение

Применение нейросетей в криптографии знаменует новый этап в защите данных. Они не только расширяют возможности традиционных методов, но и предлагают инновационные решения, способные противостоять современным и будущим вызовам. В эпоху цифровизации и квантовых вычислений нейросети становятся ключевым инструментом для обеспечения безопасности информации.

В работе рассмотрены основные подходы к повышению информационной защищенности данных, включая генерацию криптографических ключей с высокой степенью энтропии, обфускацию данных, адаптивное шифрование, превентивное обнаружение угроз и использование генеративных состязательных сетей для шифрования. Каждый из методов имеет свои преимущества и ограничения, но всех их объединяет высокий потенциал к адаптации под изменяющиеся условия и угрозы.

Особое внимание уделено генеративным состязательным сетям, которые благодаря их способности обучаться на больших данных и адаптироваться к новым угрозам открывают возможности для создания высокозащищенных систем. В долгосрочной перспективе технологии на основе генеративных состязательных сетей могут стать основой для новых стандартов в области информационной безопасности, обеспечивая высокий уровень защиты данных в условиях стремительно меняющихся угроз.

Несмотря на очевидные преимущества, использование генеративных состязательных сетей в криптографии сталкивается с рядом сложностей. Одной из ключевых проблем является высокая вычислительная сложность, требующая значительных ресурсов для обучения и эксплуатации моделей. Кроме того, обеспечение устойчивости генеративных состязательных сетей к специализированным атакам, направленным на дискриминатор, остается актуальной задачей.

В долгосрочной перспективе технологии на основе генеративные состязательные сети могут стать основой для новых стандартов в области информационной безопасности, обеспечивая высокий уровень защиты данных в условиях стремительно меняющихся угроз.

Библиографический список

1. *Abadi M., Andersen D. G.* Learning to Protect Communications with Adversarial Neural Cryptography. URL: https://arxiv.org/abs/1610.06918 (дата обращения: 11.12.2024).

2. Boosting Digital Safeguards: Blending Cryptography and Steganography / A. Maiti [et al.]. URL: https://arxiv.org/abs/2404.05985 (дата обращения: 11.12.2024).

3. *Singh P., Dutta S., Pranav P.* Optimizing GANs for Cryptography: The Role and Impact of Activation Functions in Neural Layers Assessing the Cryptographic Strength // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, № 6. P. 2379. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/14/6/2379 (дата обращения: 11.12.2024).

4. Using GAN-Based Encryption to Secure Digital Images With Reconstruction Through Customized Super Resolution Network / M. Singh [et al.] // IEEE Journals & Magazines. 2024. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/10149533 (дата обращения: 11.12.2024).

5. *Shihao Song, Xiaoyan Liang.* Federated Pseudo-Sample Clustering Algorithm: A Label-Personalized Federated Learning Scheme Based on Image Clustering // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, № 6. P. 2345. URL:

https://www.mdpi.com/2076-3417/14/6/2345 (дата обращения: 11.12.2024).

6. Multiple Extended Target Tracking Algorithm Based on Spatio-Temporal Correlation / Wei Zhang [et al.] // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, № 6. P. 2367. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/14/6/2367 (дата обращения: 11.12.2024).

7. Falah Amer Abdulazeez; Ismail Taha Ahmed; Baraa Tareq Hammad. Examining the Performance of Various Pretrained Convolutional Neural Network Models in Malware Detection // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, № 6. P. 2614. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/14/6/2614 (дата обращения: 11.12.2024).

УДК 004.42 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-55-59**

Д. Г. Левченко*
аспирант
Ю. А. Ганьшин *
кандидат технических наук, доцент.
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ДАННЫХ

Динамически изменяющиеся данные, часто встречающиеся в реальных приложениях, требуют от алгоритмов машинного обучения способности к адаптации. В данной статье рассмотрены подходы к обработке изменений концепции (concept drift) и разработке адаптивных моделей обучения. Описаны ключевые методы, включая онлайн-обучение, ансамблевые методы и метод со скользящим окном.
Ключевые слова: *адаптивные алгоритмы, онлайн-обучение, градиентный спуск, ансамблевый метод, метод со скользящим окном, модели машинного обучения.*

D. G. Levchenko*
PhD Student
Y. A. Ganshin*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ADAPTIVE LEARNING ALGORITHMS FOR DYNAMICALLY CHANGING DATA

Dynamically changing data, often encountered in real-world applications, require machine learning algorithms to have the ability to adapt. This article discusses approaches to handling concept drift and the development of adaptive learning models. Key methods are described, including online learning, ensemble methods, and the sliding window method.
Keywords: *adaptive algorithms, stochastic gradient descent classifier, gradient descent, dynamic weighted ensemble, sliding window regression, machine learning models.*

В современных задачах анализа данных часто встречаются сценарии, в которых характеристики входных данных меняются со временем. Этот феномен, известный как «изменение концепции» (concept drift), ставит перед исследователями и инженерами задачу создания алгоритмов машинного обучения, способных адаптироваться к таким изменениям. Примеры таких задач включают:

– Анализ финансовых рынков;
– Мониторинг сетевой безопасности;
– Рекомендательные системы;
– Управление потоками данных в промышленности.

Традиционные модели машинного обучения неэффективны в таких условиях, поскольку они предполагают стационарность данных. В данной статье рассматриваются современные подходы к разработке адаптивных алгоритмов обучения, способных справляться с изменяющимися данными.

Адаптивные алгоритмы

Представляют собой подходы в машинном обучении, которые способны изменять и адаптироваться к меняющимся условиям или данным. Эти модели могут автоматически корректировать свои параметры или стратегии обучения в ответ на новую информацию, что делает их полезными в таких областях, как искусственный интеллект, анализ данных, прогнозирование и обработка естественного языка.

Онлайн-обучение (SGDClassifier)

SGDClassifier (Stochastic Gradient Descent Classifier) – это классификатор, который использует стохастический градиентный спуск для оптимизации модели. Он предназначен для работы с большими данными и может обучаться на потоках данных, что делает его идеальным для задач онлайн-обучения [1].

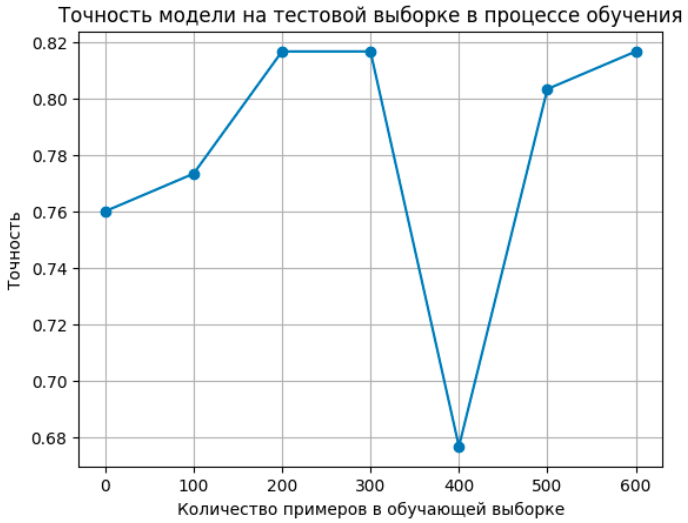


Рис. 1. График точности модели на тестовой выборке в процессе обучения при помощи метода онлайн-обучения (SGDClassifier)

Модель обновляется с каждым новым примером, что позволяет эффективно работать с большими объемами данных в реальном времени.

Для SGDClassifier используется стохастический градиентный спуск (SGD), который является методом оптимизации. Стандартная формула для обновления параметров модели в SGD выглядит следующим образом:

$$\theta_t + 1 = \theta_t - \eta \nabla_\theta J(\theta_t, x_t, y_t), \quad (1)$$

θt – параметры модели на шаге t, η – скорость обучения (learning rate), $\nabla_\theta J(\theta_t, x_t, y_t)$ – градиент функции потерь $J(\theta)$ по отношению к параметрам θ на основе текущего примера (x_t, y_t).

Функция потерь для линейной модели может быть, например, кросс-энтропия для классификации:

$$J(\theta) = -\frac{1}{N} =$$
$$= \sum_{i=1}^{N} (y_i \log(h_\theta(x_i)) + (1 - y_i)\log(1 - h_\theta(x_i))), \quad (2)$$

где y_i – целевая переменная, $h_\theta(x_i)$ – предсказание модели (сигмоида для логистической регрессии).

Преимущества SGDClassifier:

– Подходит для задач, где данные поступают постепенно (например, в потоках).

– Эффективен при работе с большими данными и высокоразмерными признаками.

– Поддерживает регуляризацию, что помогает избежать переобучения.

Недостатки SGDClassifier:

– Не всегда находит глобальный минимум, так как использует стохастический метод.

– Могут возникать проблемы с настройкой гиперпараметров (например, learning rate).

– Работает только с линейными моделями или моделями, которые могут быть аппроксимированы линейно.

Ансамблевый метод (Dynamic Weighted Ensemble)

Ансамблевые методы объединяют несколько слабых классификаторов для создания более точной и устойчивой модели. В случае Dynamic Weighted Ensemble веса каждого классификатора изменяются динамически в процессе обучения, чтобы адаптироваться к изменениям в данных [2].

Этот метод используется для повышения точности и уменьшения риска переобучения, комбинируя выводы нескольких моделей [3].

Ансамблевые методы комбинируют несколько базовых моделей. В Dynamic Weighted Ensemble веса классификаторов обновляются динамически. Пусть у нас есть M классификаторов и их соответствующие веса w_i для каждого классификатора на шаге t (рис. 2).

Процесс обновления веса может быть описан как:

$$w_i, t + 1 = w_i, t \cdot \exp(\eta \cdot \delta L_i(t)), \quad (3)$$

где w_i, t – вес классификатора i на шаге t, η – скорость адаптации, $\delta L_i(t)$ – изменение функции потерь для классификатора i на шаге t.

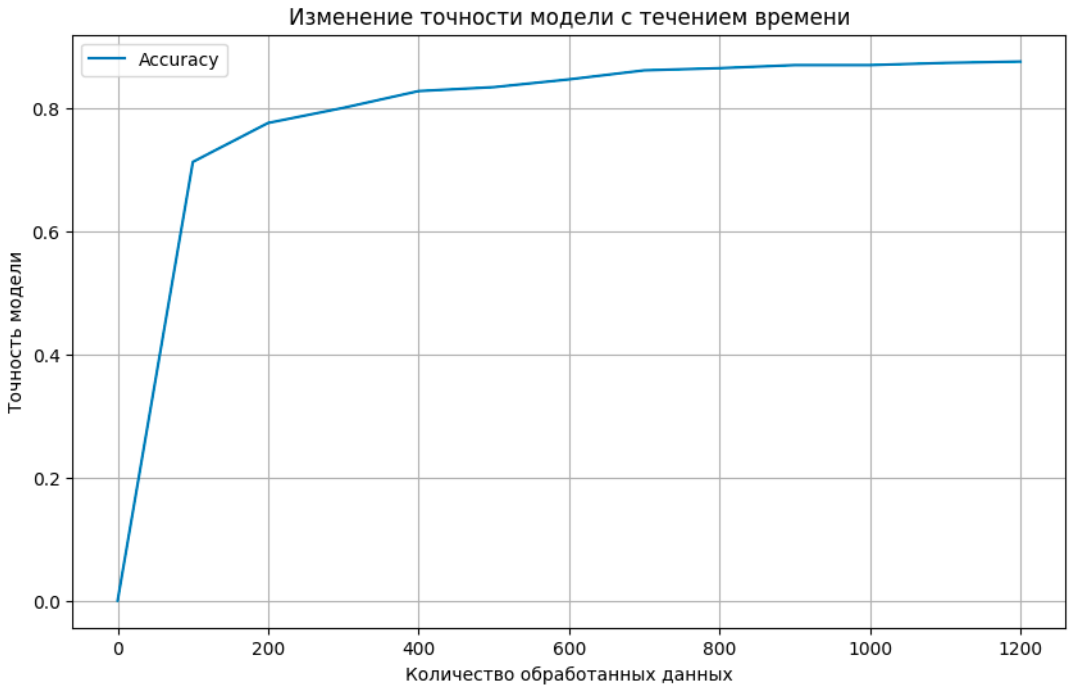


Рис. 2. Изменение точности модели с течением времени при помощи ансамблевого метода

После обновления весов, итоговое предсказание ансамбля вычисляется как взвешенная сумма предсказаний всех классификаторов:

$$\hat{y}(x) = \arg\max(\sum_{i=1}^{M} w_i \cdot f_i(x)), \quad (4)$$

где $f_i(x)$ – предсказание i-го классификатора для входа x, w_i – вес этого классификатора.

Преимущества Dynamic Weighted Ensemble:

– Объединение множества моделей часто дает более точный и стабильный результат.

– Веса классификаторов адаптируются к изменяющимся данным, что позволяет лучше справляться с нестационарностью.

– Может улучшить точность, если отдельные модели имеют разные сильные стороны.

Недостатки Dynamic Weighted Ensemble:

– Более сложен в реализации и требует больше вычислительных ресурсов.

– Может быть чувствителен к выбору базовых классификаторов и методу взвешивания.

– Потребуется больше времени на обучение по сравнению с одиночными моделями.

Метод со скользящим окном (Sliding Window Regression)

Метод со скользящим окном используется в основном для регрессионных задач, где данные обновляются с течением времени. Суть метода заключается в том, чтобы на каждом шаге рассматривать только последние **n** данных (окно), что позволяет адаптировать модель к новым данным [4].

Это полезно для задач, где важно учитывать только последние наблюдения, например, в прогнозировании временных рядов [5].

В методе со скользящим окном для регрессии используется окно фиксированного размера ω для учета последних ω наблюдений. В модели линейной регрессии параметры θ обновляются на основе данных в текущем окне (рис. 3).

Для регрессии обновление коэффициентов происходит по формуле:

$$\theta = (X^T X)^{-1} X^T y, \quad (5)$$

где X – матрица признаков в пределах окна, y – вектор целевых значений для текущего окна.

Для применения этого подхода с динамическим окном обновление модели происходит при каждом новом поступившем наблюдении, с тем, что старые данные исключаются, а новые добавляются в окно.

Так как проблема с нулевой точностью модели может быть связана с тем, что используется регрессионная модель, а метрика точности предназначена для классификации. В потоке данных целевые значения являются числовыми (для регрессии), поэтому точность (как метрика классификации) всегда будет 0.

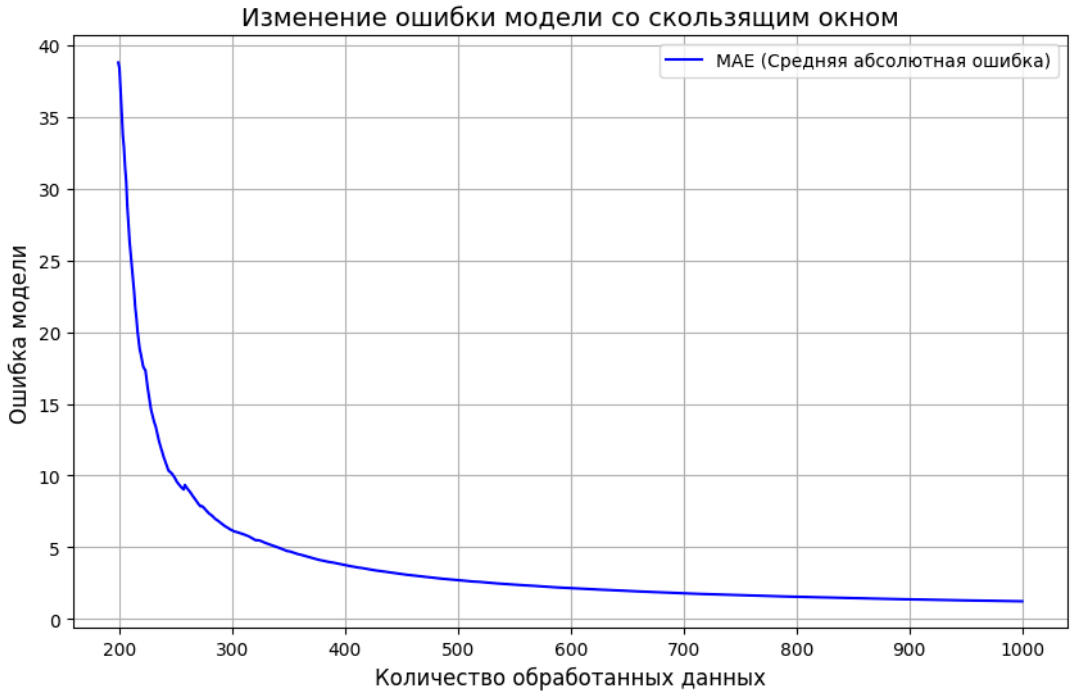


Рис. 3. Изменение ошибки модели с помощью метода со скользящим окном

Для работы с регрессией вместо точности можно использовать метрику, подходящую для регрессии, например:

– средняя абсолютная ошибка;

– среднеквадратичная ошибка;

– коэффициент детерминации.

Преимущества Sliding Window Regression:

– хорошо работает в условиях изменяющихся данных, например, при прогнозировании временных рядов;

– обновление модели происходит быстро, так как она всегда использует только актуальные данные;

– можно гибко настроить размер окна, что позволяет оптимизировать модель под различные задачи.

Недостатки Sliding Window Regression:

– Не всегда учитывает всю информацию, так как старые данные исключаются из окна.

– Может быть неэффективен при наличии долгосрочных зависимостей в данных.

– Для некоторых задач выбор оптимального размера окна может быть непростой задачей.

Если задача связана с классификацией, особенно в условиях онлайн-обучения, SGDClassifier является хорошим выбором, если данные не слишком сложные для линейной модели.

Если задача требует большей точности и устойчивости, особенно при изменяющихся данных, то Dynamic Weighted Ensemble будет более подходящим методом (табл.).

Таблица

Сравнение методов в зависимости от задачи

Метод	Тип задачи	Преимущества	Недостатки
Онлайн-обучение (SGDClassifier)	Классификация	Эффективен для больших потоков данных, поддержка регуляризации, адаптивность	Может не найти глобальный минимум, только линейные модели
Ансамблевый метод (Dynamic Weighted Ensemble)	Классификация	Повышает точность, адаптация к изменяющимся данным, устойчивость	Более сложен, требует больше ресурсов, чувствителен к выбору классификаторов
Метод со скользящим окном (Sliding Window Regression)	Регрессия, временные ряды	Адаптируется к новым данным, быстрое обновление модели	Ограничение на старые данные, неэффективен при долгосрочных зависимостях

Для задач, где данные поступают в виде временных рядов или с зависимостью от времени, Sliding Window Regression подойдет, так как фокусируется на последних наблюдениях.

Заключение

Адаптивные алгоритмы позволяют значительно повысить точность анализа данных в условиях concept drift, позволяют создавать модели, которые не только поддерживают высокую точность в условиях изменяющихся данных, но и могут работать в реальном времени, что делает их чрезвычайно полезными для различных областей, от финансовых технологий до анализа больших данных и предсказания событий. Внедрение таких алгоритмов в практику способствует созданию более гибких, эффективных и интеллектуальных систем, способных к самообучению и адаптации.

Библиографический список

1. *Bottou L.* (2010). Large-Scale Machine Learning with Stochastic Gradient Descent. Proceedings of COMPSTAT'2010, 177–186. doi:10.1007/978-3-7908-2604-3_16.

2. Ensemble Methods: Foundations and Algorithms / Zhi-Hua Zhou (New York: Chapman & Hall/CRC, 2012. 222 pp.) ISBN: 978-1-4398-3003-1.

3. *Dietterich T. G.* (2000). Ensemble Methods in Machine Learning // Proceedings of the International Workshop on Multiple Classifier Systems (pp. 1–15).

4. Forecasting: Principles and Practice. / Hyndman, Robin John; Athanasopoulos, George.2nd ed. OTexts, 2018. 384 p.

5. *Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.* The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction, 2nd edition. Springer, New York, 2009. ~~xxii +~~ 746 pp.

УДК 004.056; 004.054.53 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-60-64**

В. А. Мыльников*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ СООТВЕТСТВИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ НА ПРЕДПРИЯТИИ ТРЕБОВАНИЯМ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА

Рассмотрены организационные, юридические и программно-аппаратные вопросы обеспечения защиты персональных данных при их обработке и хранении в корпоративных информационных системах. Разработан алгоритм проверки соответствия мер защиты определенной информационной системы персональных данных требованиям законодательства, на основании которого реализован программный модуль, который может быть использован в системах, обрабатывающих персональные данные.
Ключевые слова: *информационные системы, персональные данные, комплексные системы защиты информации.*

V. A. Myl'nikov*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

METHODOLOGY FOR CHECKING THE COMPLIANCE OF PERSONAL DATA PROCESSING PROCESSES AT AN ENTERPRISE WITH THE REQUIREMENTS OF LEGISLATION

Organizational, legal and software and hardware issues of ensuring the protection of personal data during their processing and storage in corporate information systems are considered. An algorithm for checking the compliance of security measures of a certain ISPD with the requirements of legislation has been developed, on the basis of which a software module has been implemented that can be used in systems processing personal data.
Keywords: *information systems, personal data, integrated information security systems.*

На сегодняшний день личная информация о человеке обрабатывается почти в каждой сфере его жизни многими организациями и предприятиями. В целях обеспечения защиты персональных данных было принято множество нормативных актов, которые определяют требования к условиям их хранения, передачи и обработки в информационных системах. Учитывая, что информационные системы между собой имеют существенные различия, в российском законодательстве прописаны отдельные правила по обеспечению безопасности для различных систем, которые зависят от типа обрабатываемых персональных данных.

При этом часто определение уровня защищенности данных на предприятиях осуществляется экспертным путем. Соответственно, на проведение данного мероприятия уходит много рабочего времени сотрудников, входящих в состав экспертной комиссии. Автоматизация данного процесса позволит уменьшить траты людских ресурсов, а, следовательно, и экономических.

Определение персональных данных закреплено в ст. 3 Федерального закона № 152-ФЗ «О персональных данных» [1] и гласит, что это любая информация, относящаяся к прямо или косвенно определенному или определяемому физическому лицу (субъекту персональных данных).

Законодательством не определен конкретный перечень персональных данных, но их можно разделить на четыре категории.

Биометрические – физиологические отличительные черты, которые могут использоваться для установления личности. Отпечатки пальцев, радужная оболочка глаз, фотография лица и другие особенности тела наиболее востребованы на таможне, при выдаче виз и паспортов, а также на пропускных пунктах на территорию

различных организациях, в том числе университетах и школах. На сегодняшний день растет популярность использования систем биометрической оплаты. Осенью 2021 г. в Москве заработала технология Face Pay, которая позволяет оплатить проезд в метрополитене при помощи распознавания лица, а компания «Сбер» запустила «оплату лицом» в более чем 4000 магазинах. Многие смартфоны уже давно используют технологию разблокирования экрана при помощи отпечатка пальца или же сканирования лица. Отнесение фотографии к категории «биометрических» персональных данных является неоднозначным. Сама по себе фотография может и не являться биометрией. Согласно пояснению Роскомнадзора, фотография становится персональными данными (ПДн) только в том случае, если по ней можно узнать ее обладателя [2]. Например, видеосъемка в магазине, кафе и других общественных местах не классифицируется как ПДн до тех пор, пока личность человека не устанавливается. Минцифры разъяснило, что не относится к биометрии [3]:

1) фото в личном деле работника;

2) подпись и почерк;

3) рентгеновские или флюорографические снимки;

4) видео с камер в общественных местах.

Специальные – согласно ст. 10 Федерального закона № 152-ФЗ, это сведения о расовой, национальной принадлежности, политических, философских и религиозных взглядов, судимости, а также о состоянии здоровья и интимной жизни [1]. Эта информация позволяет определить принадлежность к определенным социальным группам. Присвоение особого статуса данным сведениям обусловлено, в частности, необходимостью исключения дискриминации человека по тем или иным признакам. Обычно персональные данные этого типа обрабатываются при предоставлении медицинских, социальных услуг, услуг пенсионного страхования.

Персональные данные, разрешенные субъектом для распространения – это те сведения о человеке, к которым с его согласия предоставлен доступ неограниченному кругу лиц. Чаще всего, это анкетные данные, ФИО, место жительства, номер телефона и другая информация, которая размещается в общем доступе, например, в социальных сетях. До 2021 г. такие сведения назывались общедоступными, но Федеральным законом от 30.12.2020 № 519-ФЗ формулировка была изменена, поскольку даже если сведения и находятся в общем доступе, их обработка без согласия субъекта не допускается [4].

Иные – это информация о человеке, которую нельзя отнести ни к одной из предыдущих категорий. Чаще всего, это дополнительная информация, которая может меняться в зависимости от времени, например, должность, стаж, размер заработной платы, длительность отпуска, а также сведения, содержащиеся в документах об образовании, воинского учета и др.

В организациях обработка персональных данных осуществляется в определенных структурных подразделениях. При трудоустройстве первым отделом, который начинает обработку персональных данных работника, является отдел кадров. Обработка начинается еще на этапе просмотра компанией резюме. В резюме работник указывает большое количество информации, начиная от ФИО и заканчивая информацией о прошлом месте работы. Но есть нюансы работы с резюме. Работники отдела кадров могут сохранять на свои компьютеры или печатать резюме только при наличии согласия, но в случаях если от лица соискателя действует кадровое агентство или резюме размещено в Интернете на сайтах подбора персонала, то согласие не требуется. Иногда возникает потребность обращаться на предыдущие места работы для уточнения информации о кандидате, причем необходимо заранее получить его согласие. Согласно ст. 65 Трудового кодекса Российской Федерации, при заключении трудового договора требуется предоставить определенный набор документов, таких как паспорт, трудовая книжка, СНИЛС, ИНН, военный билет, документы об образовании и др. [5].

После заключения трудового договора в отделе кадров формируется личное дело работника, в которое включается трудовой договор, заявление о приеме на работу, карточка формы № Т-2, дополнительные соглашения и приказы работодателя, которые имеют отношение к трудовой деятельности работника. Большинство компаний совершают грубую ошибку, храня в личных делах работников копии документов, которые были предоставлены при подписании трудового договора (копии паспорта, СНИЛС, ИНН и др.). Судебная практика показывает, что хранение копий данных документов признается избыточным, что нарушает ч. 5 ст. 5 Закона о персональных данных.

В рамках трудовых отношений работодатель может запрашивать только те сведения, которые требуются для выполнения трудовой функции.

Согласно ч. 1 ст. 6 Закона о персональных данных одним и самым частым из оснований обработки персональных данных является со-

гласие человека, которое было дано свободно, своей волей и в своем интересе. Главным условием является то, что согласие может быть отозвано в любой момент времени. В согласии на обработку обязательно должны быть определены цели обработки, перечень обрабатываемых ПДн и действия, совершаемые с ними.

Все действия с носителями персональных данных должны совершаться в соответствии с правилами ведения конфиденциального документооборота в организации. Все этапы жизни документа должны быть отражены в журналах учета и регистрации для исключения утери материальных носителей. Одним из основных

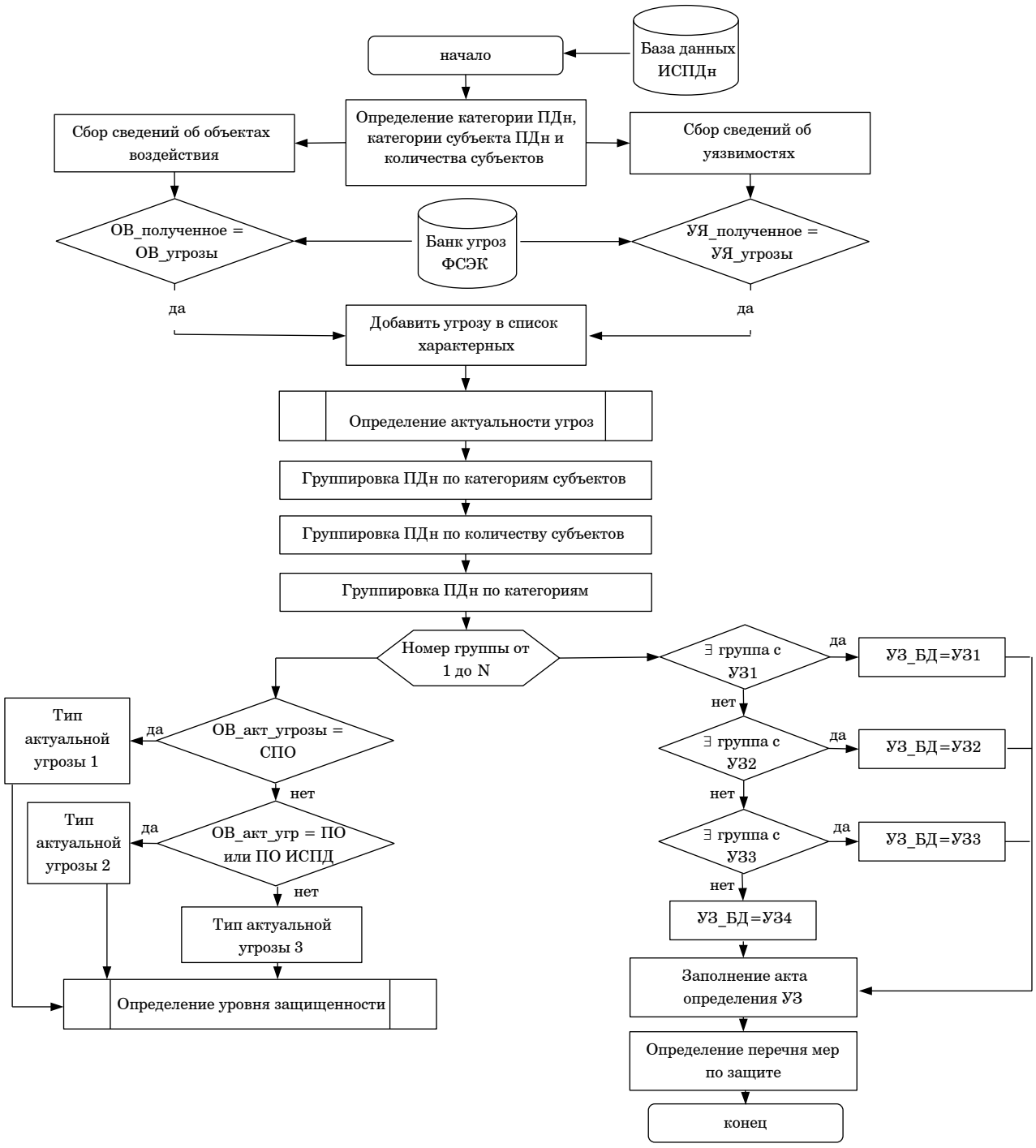


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

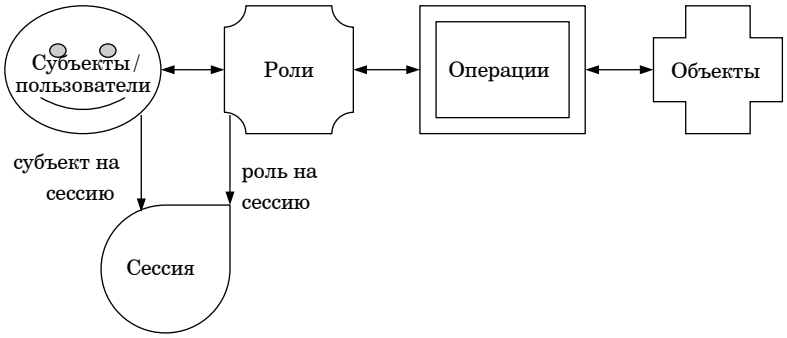


Рис. 2. Модель ролевого управления доступом

требований при работе с персональными данными является обеспечение конфиденциальности, целостности и доступности этих данных.

Обработка персональных данных может осуществляться в информационных системах персональных данных. Прежде чем приступить к обработке персональных данных, вам необходимо отправить уведомление в Роскомнадзор. Внесение персональных данных в реестр операторов является способом легализации деятельности по обработке ПД, особенно в информационных системах персональных данных (ИСПДн).

Регулирующие органы определили перечень требований к защите, которые должны применяться при обработке персональных данных. Требования зависят от уровня защищенности ИСПДн. Определение уровня защищенности осуществляется в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 01.11.2012 № 1119 [6], а состав мер и требований к защите ИСПДн определен в Приказе ФСТЭК России от 18.02.2013 № 21 [7].

Проверка соответствия мер защиты определенной ИСПДн требованиям разделена на несколько этапов, на которых также происходит взаимодействие с пользователем и иными компонентами системы:

1) Сбор предварительной информации.

2) Определение перечня актуальных угроз.

3) Определение уровня защищенности.

4) Формирование отчетов.

Блок-схема алгоритма приведена на рис. 1. Алгоритм разработан на основании государственных стандартов.

На основе алгоритма (рис. 1) был разработан программный модуль «Проверка ИСПДн» для корпоративной информационной системы предприятия.

В модуле используются определенные роли и привилегии для ограничения доступа к системе, путем ограничения доступа тем минимумом, который требуется для выполнения работы и не более. Схема описанной модели представлена на рис. 2. Данная модель имеет следующие элементы:

1) Субъект.

2) Роль.

3) Сессия.

4) Разрешения.

В системе имеются следующие роли:

1) Гость – роль с минимальным набором прав.

2) Администратор – работник, проводящий работы по администрированию и развитию функционала (сотрудник отдела информационной безопасности).

3) Аудитор – работник, проводящий работы по ведению и анализу информационной безопасности (сотрудник отдела информационной безопасности, в обязанности которого также входит проведение проверок).

4) Эксперт – работник, проводящий проверки текущего состояния системы (сотрудник руководящего состава отдела информационной безопасности).

Таким образом, использование предложенной методики поможет автоматизировать процессы приведения информационных систем обработки персональных данных к требованиям законодательства, что позволит повысить эффективность работы всего предприятия за счет сокращения трудоемкости выполнения рутинных операций и исключения «человеческого фактора», что также увеличит уровень защиты данных от несанкционированного доступа.

Библиографический список

1. Федеральный закон «О персональных данных» от 27.07.2006 N 152-ФЗ. М.: Омега-Л, 2006. 22 с.

2. Письмо Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций от 29 августа 2022 г. № 08-78032 «О рассмотрении обращения». URL: https://base.garant.ru/405223637/ (дата обращения: 26.04.2024).

3. Письмо Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ от 28 декабря 2023 г. N П24-2-04-070-257558 «О направлении информации». URL: https://base.garant.ru/408412169/ (дата обращения: 26.04.2024).

4. Федеральный закон от 30 декабря 2020 г. № 519-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О персональных данных» // Собрание законодательства РФ. 2020.

5. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 ноября 2001 № 197-ФЗ // Собрание законодательства РФ. 2002.

6. Постановление Правительства РФ от 1 ноября 2012 г. № 1119 «Об утверждении требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных» // Собрание законодательства РФ. 2012.

7. Приказ ФСТЭК России от 18.02.2013 № 21 (ред. от 14.05.2020) «Об утверждении Состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных» // Собрание законодательства РФ. 2013.

УДК 004.056 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-65-68**

В. А. Мыльников*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПОВЕДЕНЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДЕЙСТВИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

В статье рассмотрены вопросы оценки действий пользователя в информационной системе с помощью методов поведенческой аутентификации. Предложен алгоритм оценки поведения пользователя в системе при использовании клавиатуры и других манипуляторов. Определен набор показателей оценки поведения и условий применения предложенных моделей. Предлагаемые решения можно использовать при решении вопросов обеспечения информационной безопасности безопасности в корпоративных информационных системах.
Ключевые слова: *информационная безопасность, защита информации, автоматизированные системы, поведенческая аутентификация.*

V. A. Myl'nikov*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

BEHAVIORAL ASSESSMENT OF USER ACTIONS IN AN INFORMATION SYSTEM

The article considers the issues of assessing user actions in an information system using behavioral authentication methods. An algorithm for assessing user behavior in the system when using a keyboard and other manipulators is proposed. A set of indicators for assessing behavior and conditions for applying the proposed models is determined. The proposed solutions can be used to address issues of ensuring information security in corporate information systems.
Keywords: *information security, information protection, automated systems, behavioral authentication.*

Современная ИТ-инфраструктура экономики характеризуется стремительным ростом разнообразных средств и методов хищения информации и, как следствие, развитием информационной преступности. Значительный рост утечек данных наблюдается с 2022 г., причем в основном увеличиваются масштабы утечек, а не их количество. По данным исследований «Лаборатории Касперского», в 2022 г. было зафиксировано 168 утечек при 290 млн строк персональных данных, а в 2023 г. при 133 утечках количество данных уже оценивалось в 310 млн строк. В 2024 г. данная тенденция сохраняется. Всего один инцидент в феврале 2024 г. практически перекрыл собой 2023 и 2022 гг. суммарно – 510 млн строк.

В настоящее время государство реагирует на подобные инциденты путем ужесточения административных и уголовных наказаний, а также введением штрафов за повторные правонарушения. Такая ситуация ведет к необходимости разработки и реализации дополнительных мер защиты информации непосредственно в самих информационных системах.

Одним из «слабых мест» автоматизированной информационной системы выступает пользователь. Человеческий фактор (месть, самоутверждение и т. д.), конкуренция (например, между компаниями, странами) и желание заработать являются целью действий злоумышленника.

Различные интернет-платформы используют различные методы защиты аккаунта пользователя и его данных, безопасность пользователей выходит на новый уровень – в бытовые и коммерческие системы начинают внедрять методы защиты, основанные на поведении. Руководитель отдела развития продуктов компании InfoWatch, отмечает, что обнаружение аномального поведения и анализ клавиатурного почерка пользователя являются двумя популярными направлениями инновационной деятельности.

Биометрические системы защиты информации основаны на личном генетическом коде че-

ловека: физиология (геометрия ладони, ДНК и т. д.) и поведение. Все биометрические системы работают по одной схеме: процесс записи биометрического образца (одного или больше в зависимости от системы), обработка и преобразование в математический код. Идентификация и аутентификация пользователей в биометрических системах безопасности проходят в следующем порядке:

1. Регистрация идентификатора (сведение о физиологической и/или поведенческой характеристике в формате, доступным компьютерным технологиям, записывается в память системы).

2. Выделение уникальных признаков (анализ внутри системы).

3. Сопоставление сведений (сравнение записанных образцов с предъявленными).

4. Заключение (совпадают или нет образцы, транслирование результата другим системам при необходимости).

Для биометрических технологий важно достоверно различать биометрические характеристики и находить совпадения – так определяется надежность системы, что не отменяет вероятность ошибки, которая зависит от системы и определяется используемыми биометрическими технологиями (важнее пропустить «чужого» или не пропустить «своего»). Также существуют универсальные критерии биометрической идентификации для определения эффективности системы контроля и управления доступом [1].

Информационная безопасность, основанная на поведенческих характеристиках, не только рассматривается в теории и обсуждениях, но и активно внедряется в эксплуатацию. Существуют программы для отслеживания действий пользователей в локальной сети.

Во многих странах для общественной безопасности внедрены системы распознавания не только лиц, но и геометрии тела, его температуры, являющиеся уже неотъемлемой частью инфраструктуры. Камеры наблюдения установлены не только в аэропортах, магазинах и других общественных местах, а также на улицах городов. Однако из-за большого количества ложных срабатываний таких методов активно разрабатываются решения в биометрии, основанные на иных характеристиках. Помимо различных реализации и внедрений устройств, направленных на определение физиологических характеристик человека, появляются технологии и исследования его поведения. Направлений использования таких технологий множество. Например, в области безопасности на транспорте, на вокзалах и в аэропортах, в местах массового скопления людей.

Одним из методов решения данной задачи является использование кейлоггеров [2], что дает возможность анализировать работу пользователя с клавиатурой, однако такой подход не позволяет учитывать многие важные показатели работы, такие как сравнение скорости и динамики ввода или частота возникновения ошибок. Кроме того, отслеживание работы с манипуляторами (например, компьютерная мышь) является недостаточно распространенным решением из-за сложности реализации и внедрения. В рамках отслеживания скорости перемещения манипулятора можно рассмотреть чувствительность, паттерны перемещения и скорость. Стоит отметить, что индивидуальные характеристики устройств (клавиатуры и мыши) сказываются на всех показателях и являются также важным аспектом.

Оценка поведения пользователя при авторизации в информационной системе может являться инструментом повышения уровня ее информационной безопасности. Проходя определенные этапы (рис. 1), пользователь подтверждает свое право находиться в системе. Данный процесс состоит из пяти этапов: авторизация, отслеживание клавиатурного почерка, отслеживание скорости перемещения манипулятора, сопровождение рабочего сеанса и формирование отчета.

На этапе авторизации пользователя фиксируется его IP-адрес, а потенциальный инцидент информационной безопасности можно отследить на любом этапе проверки пользователя. Выявленный инцидент отмечается на формировании отчета, откуда формируется корректировка анализа поведения пользователя. Так как под инцидентом подразумеваем нарушение политики безопасности.

Работа «Авторизация» (рис. 1) состоит из идентификации, аутентификации и разрешении доступа к системе. Здесь при нарушении показателей клавиатурного почерка и/или скорость манипулятора авторизация должна быть пройдена повторно. Сравнение скорости ввода, сравнение динамики ввода, сравнение частоты возникновения ошибок и сравнение используемых клавиш – ключевые работы процесса отслеживания клавиатурного почерка. Если каждая работа не выявляет отклонение от паттернов пользователя, соответствующего заявленному ранее идентификатору, то начинается процесс отслеживания манипулятора.

В базе данных аккаунтов системы хранятся все шаблоны, с которыми сравниваются вводимые пользователем данные. Для качественной работы отслеживания поведения необхо-

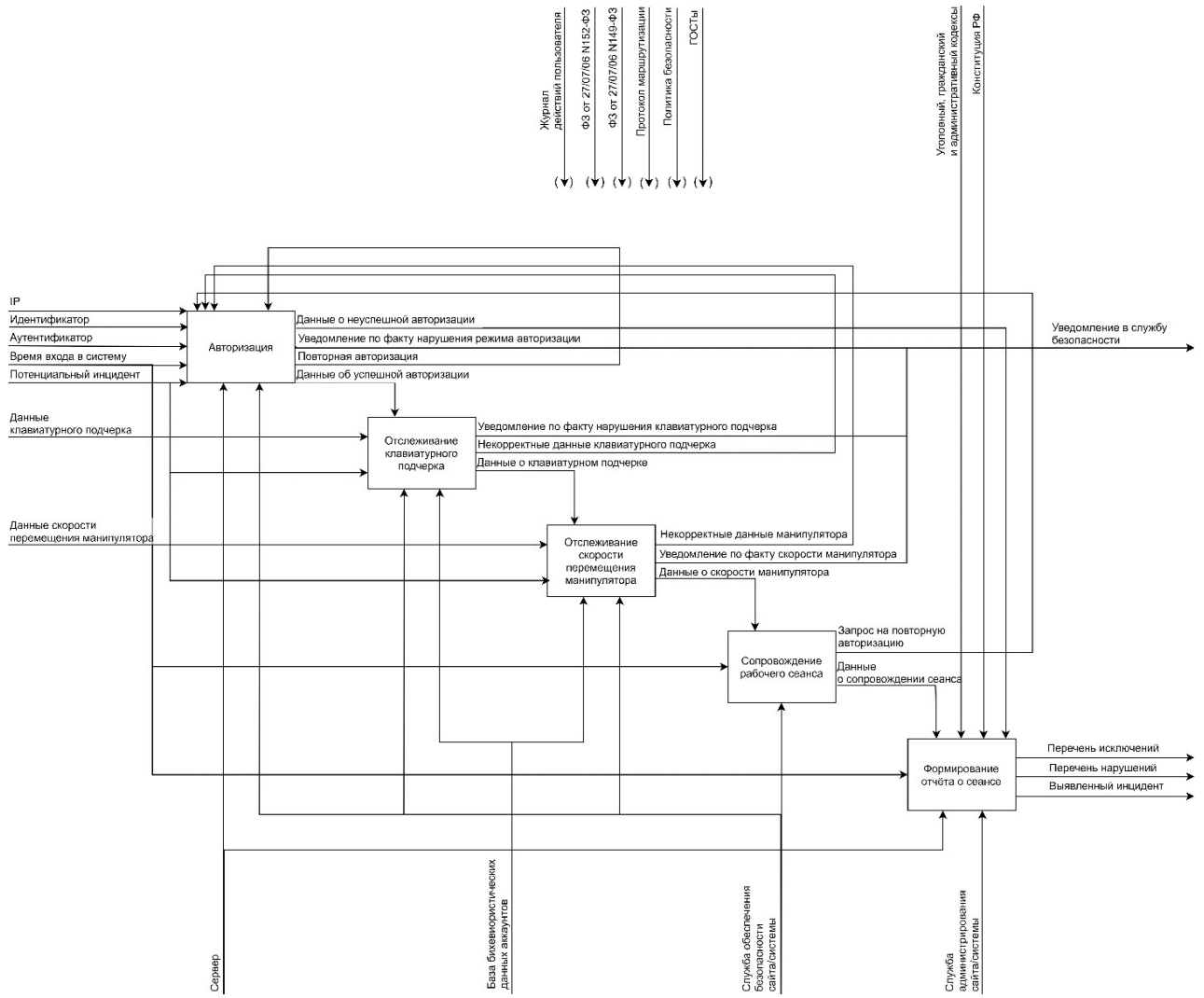


Рис. 1. Модель оценки поведения пользователя в системе

димо брать образцы в разных психологических состояниях пользователя, так как от этого напрямую зависит его поведенческие характеристики. Рассматривать и определять необходимые состояния для четкой работы процесса рекомендуется вместе с психологом и отталкиваясь от специфики работы пользователя в системе. Можно выделить состояния нервно-эмоционального напряжения, утомления, психического пресыщения и монотонии у людей, которые работают в условиях напряженного умственного и/или физического труда.

Для отслеживания скорости перемещения манипулятора выполняются работы по сравнению чувствительности манипулятора, паттернов перемещения манипулятора и скорости перемещения манипулятора. Стоит отметить, что результаты оценки сильно зависят от характеристик манипулятора. Обычно манипулятором выступает мышь. Сравнение чувствительности манипулятора состоит из анализа времени отклика манипулятора, его траектории и двойного отклика, а также анализа срабатывания случайных кнопок и сравнения данных по идентификатору. Данные параметры говорят не только о поведенческих привычках пользователя пользования манипулятора, а также об используемом устройстве. То есть смена используемого манипулятора создаст уведомление в службу безопасности о нарушении обычного паттерна. Функция сравнения скорости перемещения манипулятора включает задачи анализа средней и мгновенной скорости манипулятора, сравнение с данными по идентификатору.

При сопровождении рабочего сеанса происходит анализ проблем и изменений, внесение изменений, проверки и приема изменений при сопровождении, переноса или снятия с эксплуата-

ции. Если в процессе этой работы находятся нарушения, идет переход к повторной авторизации. По завершении рабочего сеанса формируется итоговый отчет и алгоритм завершается.

Основной целью безопасности оценки поведения пользователя в информационных системах является обнаружение с последующей (частичной) идентификацией нарушителя, источника хищения закрытой информации посредством нежелательного воздействия на компоненты протокола и взаимосвязанных с протоколом компонентов сайта/системы, создание базы нарушений в случае не предупрежденных атак [3].

Достижение поставленной цели будет доступно при условии соблюдения следующих условий:

– Обеспечение условий безопасного использования сайта/системы.

– Идентификация и аутентификация пользователей.

– Обеспечение условий безопасного функционирования.

– Обеспечение надежной передачи информации.

– Управление информационными потоками.

– Соответствие требованиям Федерального законодательства, нормативно-методических документов ФСБ России, ФСТЭК России и договорным обязательствам в части информационной безопасности.

– Своевременное выявление, оценка и прогнозирование инцидентов.

Список источников

1. *Мальцев А.* Современные биометрические методы идентификации. URL: https://habrahabr.ru/post/126144/.

2. *Олейникова П. А., Свирщ А. О.* Кейлоггеры: вопросы санкционированного и несанкционированного применения // Modern science. 2021. № 12-4. С. 289–295.

3. Методика оценки рисков информационных систем на основе анализа поведения пользователей и инцидентов информационной безопасности / С. В. Беззатеев [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 4. С. 553–561.

УДК 004.056.53 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-69-72**

А. Э. Насибов*
аспирант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ОПЕРАТИВНЫХ ЦЕНТРОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Приведен сравнительный анализ технологий и компонентов, используемых при разработке отечественных оперативных центров информационной безопасности.
Ключевые слова: *оперативный центр безопасности, SIEM, XDR, IRP, NTA, WAF, open source решения, кибербезопасность.*

A. E. Nasibov*
PhD Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ANALYSIS OF TECHNOLOGIES USED IN THE DEVELOPMENT OF DOMESTIC OPERATIONAL CENTERS FOR INFORMATION SECURITY

A Comparative Analysis of Technologies and Components Used in the Development of Domestic Operational Security Centers
Keywords: *Operational Security Center, SIEM, XDR, IRP, NTA, WAF, Open Source Solutions, Cybersecurity.*

В современном мире вопросы кибербезопасности приобретают особую актуальность. Российские предприятия все чаще сталкиваются с необходимостью защищать свои информационные активы от внешних и внутренних угроз. Одним из ключевых инструментов в этой области являются оперативные центры безопасности (SOC), которые обеспечивают мониторинг, анализ и реагирование на инциденты кибербезопасности.

Цель данного анализа – рассмотреть текущие тенденции и практики в области разработки и функционирования оперативных центров безопасности в России. В ходе исследования проанализированы существующие центры, их организационная структура, применяемые технологии и инструменты, а также особенности взаимодействия с другими элементами системы информационной безопасности.

В табл. 1 представлены данные об используемых технологиях, стоимости и особенности отечественных коммерческих оперативных центров. В данной таблице разобраны пять ведущих оперативных центров: Kaspersky SOC, Solar JSOC, PT Expert Security Center, BI.Zone, Перспективный мониторинг. После изучения рынка были сделаны выводы в пользу разработки собственного оперативного центра:

1) Стоимость лицензий и обслуживания превышают возможные первоначальные взносы на внедрение и настройку собственных разработок.

2) С созданием собственного центра пропадает зависимость от конкретного поставщика услуг или технологий. Это позволяет избежать рисков, связанных с изменением ценовой политики, прекращением поддержки или изменением условий использования коммерческих решений.

3) Использование open source решения можно адаптировать под любые специфические нужды организации, а также владение полным контролем над настройками и возможностью интеграции.

4) Разработка так же способствует профессиональному развитию сотрудников и высококвалифицированной команды кибербезопасности.

Однако необходимо учитывать и потенциальные недостатки создания собственного центра. Например, могут возникнуть проблемы с масштабируемостью и устойчивостью к кибератакам, требующие значительных ресурсов

Таблица 1

Сравнительная таблица Оперативных центров

Центр Параметр	Лаборатория Касперского (Kaspersky SOC)	Ростелеком Солар (Solar JSOC)	Positive Technologies Expert Security Center	BI.Zone	Перспективный мониторинг
Используемые технологии	SIEM – Kaspersky Security Center. EDR – Kaspersky Endpoint Security	SIEM – не имеют собственных разработок. EDR – Solar Dozor. IRP – IRP Solar	SIEM – MaxPatrol. XDR – PT XDR. NTA – PT NAD. WAF – PT AF	SIEM – не разглашается. EDR – BI.Zone TDR. WAF – BI.Zone WAF. IRP – BI.Zone IRP	SIEM – не разглашается. EDR – не разглашается. IDS – IDS ViPNet
Возможности	Круглосуточный мониторинг. Реагирование на инциденты Углубленный анализ угроз. Управление уязвимостями	Круглосуточный мониторинг. Реагирование на инциденты. Углубленный анализ угроз. Управление уязвимостями. Обучение сотрудников	Круглосуточный мониторинг Реагирование на инциденты Углубленный анализ угроз Управление уязвимостями Консультационные услуги	Круглосуточный мониторинг Реагирование на инциденты Углубленный анализ угроз Управление уязвимостями Обучение сотрудников Консультационные услуги	Круглосуточный мониторинг Реагирование на инциденты Углубленный анализ угроз Управление уязвимостями Обучение сотрудников Перспективный мониторинг Консультационные услуги
Особенности	Широкая интеграция с продуктами Kaspersky	Поддержка в соблюдении нормативных требований	Глубокая экспертиза в анализе угроз Интеграция с MaxPatrol платформами	Интеграция с продуктами BI.Zone. Программа обучения и повышения осведомленности	Акцент на прогнозирование угроз. Программа обучения и повышения осведомленности
Технические требования	Средние	Средние	Высокие	Средние	Низкие
Примерная стоимость	От 500,000 руб./мес	От 400,000 руб./мес	От 450,000 руб./мес	От 550,000 руб./мес	От 550,000 руб./мес

на поддержание и обновление систем безопасности. Эти проблемы подчеркивают важность тщательного выбора и внедрения ключевых компонентов и технологий, которые обязательны при разработке оперативных центров.

Кроме того, можно выделить компоненты и технологии, которые обязательны при разработке оперативных центров, например, SIEM, EDR(XDR), WAF, а также один из компонентов, осуществляющих мониторинг трафика IDS\ NTA. Данные выводы будут учитываться при проектировании оперативного центра.

Ранее были выделены основные компоненты и технологии, которые используются для построение коммерческих оперативных центров. Для проектирования собственного оперативного центра выгоднее внедрять open source решения. Такой набор технологий, как SIEM, XDR, IRP, NTA, WAF, является достаточным для обнаружения и предотвращения внешних угроз данных, так как:

1) SIEM собирает и централизует логи из множества источников событий безопасности, обеспечивая полное представление о сети и ее активности. Позволяет быстро анализировать данные и связывать события между собой, что помогает в обнаружении сложных атак [4]. SIEM является основным компонентом для сбора данных от других систем (XDR, NTA, WAF) и создания единой базы данных событий безопасности. Логи и события, собранные SIEM, служат основой для работы IRP, обеспечивая автоматизацию реагирования на инциденты;

2) IRP координирует все этапы реагирования на инциденты, от обнаружения до восстановления. Автоматизирует рутинные задачи и снижает время реагирования и уменьшает вероятность ошибок. IRP получает данные от SIEM, XDR для формирования полного контекста инцидентов;

3) XDR обеспечивает мониторинг безопасности конечных точек, сетевых устройств и серве-

ров. Идентифицирует и устраняет уязвимости в системе. XDR интегрируется с SIEM для передачи данных о безопасности, которые дополняют общую картину угроз. Обнаруженные XDR инциденты передаются в IRP для автоматизации реагирования;

4) NTA анализирует сетевой трафик в реальном времени, выявляя аномалии и подозрительную активность. Выявление атак, которые могут не быть видны на уровне конечных точек или приложений. NTA отправляет данные о сетевом трафике в SIEM для централизованного анализа;

5) WAF защищает веб-приложения от распространенных атак, таких как SQL-инъекции и XSS. Контроль доступа и мониторинг трафика помогают предотвращать несанкционированные действия и атаки. WAF интегрируется с SIEM для передачи данных о веб-атаках.

Рассмотрим архитектурную взаимосвязь данных компонентов, продемонстрированную на рис. 1.

Схема архитектурной взаимосвязи компонентов:

1) Сбор данных: Все компоненты (XDR, NTA, WAF) передают свои данные в SIEM. Это обеспечивает централизованное хранение и корреляцию событий.

2) Анализ и корреляция: SIEM анализирует собранные данные и выявляет потенциальные угрозы. Коррелированные события передаются в IRP.

3) Реагирование: IRP координирует реагирование на инциденты, используя автоматизированные процессы. Команды для блокировки и фильтрации трафика передаются в WAF и другие системы безопасности.

4) Мониторинг и защита: XDR и NTA продолжают мониторинг конечных точек и сетевого трафика, выявляя новые угрозы и передавая данные в SIEM.

Комбинация этих технологий обеспечивает всестороннюю защиту и эффективное обнаружение, и предотвращение внешних угроз за счет:

– Каждый компонент системы охватывает различные аспекты безопасности, от сбора и анализа данных до управления инцидентами и защиты веб-приложений.

– Интеграция между SIEM, NTA, IRP, XDR и WAF позволяет создать единую, скоординир-

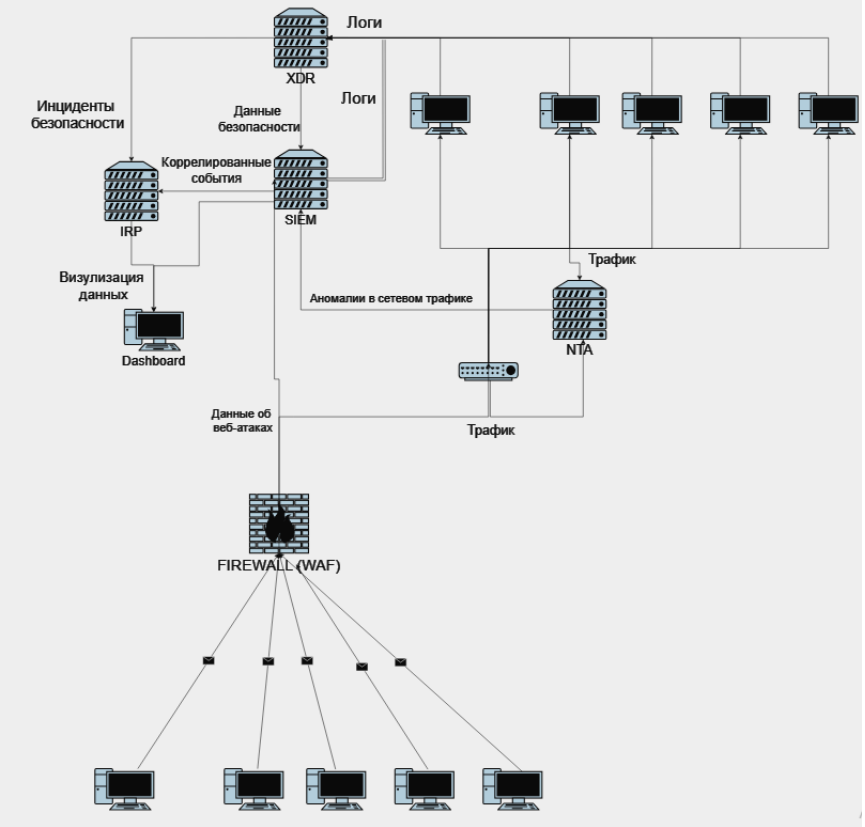


Рис. 1. Схема архитектурной взаимосвязи компонентов

рованную систему, где все компоненты взаимодействуют для обеспечения максимальной безопасности.

– Управление уязвимостями и автоматизация реагирования на инциденты позволяют не только быстро реагировать на текущие угрозы, но и предотвращать возможные будущие атаки.

Таким образом, разработка собственного оперативного центра является перспективным решением для организаций, стремящихся минимизировать расходы, получить полный контроль над системой безопасности и адаптировать ее под свои потребности. Интеграция таких технологий, как SIEM, XDR, IRP, NTA и WAF, обеспечивает комплексную защиту за счет высокой степени интеграции и возможности проактивного управления угрозами. Такой подход позволяет не только противодействовать текущим вызовам, но и эффективно предотвращать будущие атаки.

Библиографический список

1. Kaspersky. Security Operations Center (SOC). URL: https://www.kaspersky.co.uk/enterprise-security/security-operations-center-soc (дата обращения: 01.02.2024).

2. PT-СОЛАР. JSOC услуги. URL: https://rt-solar.ru/services/jsoc/ (дата обращения: 01.02.2024).

3. Positive Technologies. Услуги ESC. URL: https://www.ptsecurity.com/ru-ru/services/esc/ (дата обращения: 01.02.2024).

4. *Никифоров Д.* Как работает SOC (Security Operations Center). URL: https://habr.com/ru/companies/croc/articles/353324/ (дата обращения: 01.02.2024).

5. *Ковалев Д. О., Милославская Н. Г.* Особенности построения современных систем управления информационной безопасностью // Доклады ТУСУР. 2008. № 2-1(18). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-postroeniya-sovremennyh-sistem-upravleniya-informatsionnoy-bezopasnostyu (дата обращения: 03.02.2024).

УДК 004.415.538 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-73-76**

Г. А. Прохоров*
студент
А. В. Афанасьева*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ФАЗЗИНГ-ТЕСТИРОВАНИЕ И СПОСОБЫ ЕГО УЛУЧШЕНИЯ

Среди большого количества способов тестирования программного обеспечения можно выделить метод динамического анализа, или, как его еще называют, фаззинг. Данный способ позволяет тестировать продукт в автоматическом или полуавтоматическом режиме и находить такие ошибки, как выход за границы массива, деление на ноль, гонки и другие уязвимые места в коде, которые сложно найти во время ручного тестирования. Существует множество видов фаззинг-систем, предназначенных для решения различных задач. Все они имеют свои преимущества и недостатки. В данной статье будут рассмотрены основные типы таких инструментов и выделены наиболее интересные и универсальные варианты. Для этих вариантов будут рассмотрены основные недостатки и предложены возможные варианты для их решения.
Ключевые слова: *фаззинг, GreyBox, обратная связь.*

G. A. Prokhorov*
Student
A. V. Afanasyeva
Senior lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

FUZZING TESTING AND WAYS TO IMPROVE IT

Among the large number of software testing methods, one can single out the dynamic analysis method, or, as it is also called, fuzzing. This method allows you to test the product in automatic or semi-automatic mode and find errors such as going beyond the boundaries of the array, division by zero, races and other vulnerabilities in the code that are difficult to find during manual testing. There are many types of fuzzing systems designed to solve various tasks. All of them have their advantages and disadvantages. This article will examine the main types of such tools and highlight the most interesting and versatile options. For these options, the main disadvantages will be considered and possible solutions will be proposed.
Keywords: *fuzzing, GreyBox, feedback.*

Введение

В современном мире сложно недооценить важность проведения тестирования во время разработки продукта. Тестирование позволяет заранее найти потенциальные уязвимости и устранить допущенные ошибки. Это, в свою очередь, позволяет избежать финансовых и репутационных потерь в будущем [1].

Существует большое количество видов и способов тестирования, начиная от создания юнит тестов, которые пишут сами разработчики программного обеспечения, заканчивая инструментами, позволяющими выполнить автоматический анализ кода.

Каждый вид тестирования необходим на определенных этапах разработки. Дальше будет рассмотрен один из инструментов для автоматического анализа кода.

Ценность автоматического анализа основана на том, что человек не может предусмотреть все возможные сценарии во время написания ручных тестов и внимательно проверить каждую строчку кода в большом проекте. Автоматические системы анализа позволяют проверить продукт на ошибки и уязвимости без использования большого количества времени разработчиков.

Автоматические анализаторы можно разбить на две основные группы: инструменты статического и динамического анализа.

Статические системы выполняют анализ кода без реального выполнения программ. Они позволяют ускорить процесс разработки и найти реальные или потенциальные ошибки, например, неправильное использование конструкций языка или наличие незакрытых ветвей в условном операторе. Для выполнения ана-

лиза используются проверки на соответствие стандартам языка программирования, формирование объектного кода, а также эвристические методы.

Динамические инструменты, напротив, основываются на анализе выполнения кода в реальном времени. Они направлены на поиск не потенциальных, а уже существующих ошибок. Данный вид анализа и будет рассмотрен дальше.

Фаззинг

Динамический анализ, или фаззинг (от английского fuzz «испытание пушинками»), это метод тестирования программного обеспечения, направленный на изучение реакции программы на получение неожиданных, неправильных и нестандартных данных. Данные могут формироваться, случайным образом, по заданному шаблону или на основе анализа поведения тестируемого продукта [2].

Главной задачей такого тестирования является поиск комбинаций данных, способных заставить программу зависнуть или вовсе перестать работать.

Инструменты для проведения фаззинг-тестирования называются фаззерами. Существует большое количество таких инструментов, предназначенных для решения разных задач разными способами. На рис. 1 представлена схема основных видов фаззеров.

Рассмотрим классы, представленные на рис. 1. Первая категория – это виды фазеров по доступу к тестируемому объекту.

BlackBox фаззеры. Самые простые системы для фаззинга. Используются для анализа приложений, работающих удаленно или для анализа встроенного ПО. Инструмент не обладает никакими сведениями о тестируемой системе. Взаимодействие происходит только при помощи внешних интерфейсов продукта.

GreyBox фаззеры. У данных систем, как и у BlackBox, нет доступа к исходным кодам программы, но взаимодействие происходит со скомпилированным продуктом. У инструмента есть возможность получения определенной информации о состоянии тестируемого ПО в виде обратной связи.

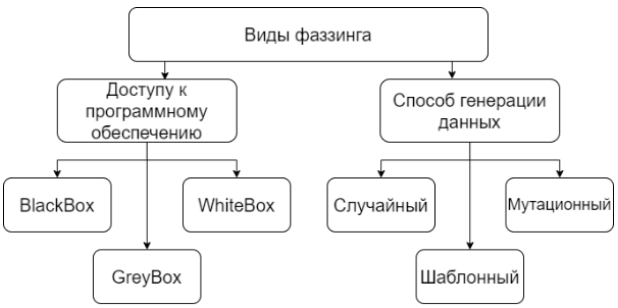


Рис. 1. Виды фаззинг-инструментов

WhiteBox фаззеры. Тестирование происходит на основе исходного кода продукта. У инструмента есть возможность модифицировать поведение ПО для сбора необходимых метрик и организации наиболее эффективного тестирования.

Вторая категория – это виды фазеров по способу генерации данных.

Случайные системы. Инструмент случайным образом генерирует последовательности данных, подаваемые на вход системы. Этот способ генерации является самым простым и наименее эффективным.

Шаблонные системы. Инструмент имеет представление о структуре данных, которые обрабатывает продукт. Благодаря этому фаззер может не просто перебирать случайные данные, но и модифицировать определенные блоки шаблона, например, поле источника у UDP пакета.

Мутационные системы. Наиболее продвинутый способ генерации данных. Для его использования необходимо наличие обратной связи с продуктом. Инструмент, как и прошлый, обладает сведениями о структуре входных данных, но вместо случайной модификации определенных областей, он строит дерево мутаций пакетов. В случае, если обратная связь была положительной – ветвь мутации получает развитие, в противной ситуации ветвь перестает развиваться, и фаззер переходит к новому варианту модификации данных.

В табл. 1 представлена сводная информация о преимуществах описанных инструментов.

GreyBox фаззинг

По табл. 1 видно, что наиболее эффективным является класс WhiteBox инструментов, но за счет сложности интеграции, в больших проектах внедрение таких систем может вызвать проблемы: необходимо создавать новые зависимости, модифицировать текущие компиляторы или менять их, исправлять возникающие конфликты. Все эти факторы играют против WhiteBox класса, делая процесс внедрения системы затратным с экономической стороны. Кроме этого, во время тестирования не всегда имеется доступ к исходному коду проекта.

Учитывая вышесказанное, большой интерес для больших проектов представляет ком-

Таблица 1

Сравнительная характеристика фаззинг-инструментов

Вид	Эффективность тестирования	Сложность интеграции	Анализ обратной связи	Анализ покрытия кода	Доступные виды генерации данных
WhiteBox	Наивысшая эффективность тестирования за счет анализа исходного кода	Необходимо внедрение дополнительных инструментов компиляции	+	+	Все
GreyBox	Хорошая эффективность за счет анализа обратной связи	Подключение к тестируемому ПО через внешний двусторонний канал	+	–	Все
BlackBox	Низкая эффективность. Анализ занимает много времени за счет случайного перебора значений	Подключение к тестируемому ПО через внешний канал	–	–	Случайный, шаблонный

бинация GreyBox системы с мутационными алгоритмами. Эти системы предоставляют схожий с WhiteBox функционал, но процедура их интеграции значительно проще. При этом GreyBox фаззинг, в отличие от BlackBox, может использовать мутационные алгоритмы, которые позволяют значительно ускорить процесс тестирования и его эффективность, в отличие от альтернативных вариантов генерации данных.

Наиболее известными GreyBox системами являются фаззеры AFL-NET [3] и AFL-SMART [4], построенные на базе проекта AFL. Эти фаззеры предназначены для тестирования серверных клиентов по интернет-соединению. В качестве обратной связи они принимают коды ответа сервера и, на их основе, выполняют мутации данных. По схожим схемам работают и остальные GreyBox фаззеры.

Проблема

У описанной системы существует недостаток: не все состояния программного обеспечения можно описать кодами ответа, особенно если необходимо исследовать неожиданные для программ сценарии. Также не все продукты обладают функцией отправки кода ответа при получении запроса во время взаимодействия. В этих случаях, при необходимо использовать «умный» фаззинг возникают проблемы: нужно добавлять в продукт лишний функционал, который будет использоваться только в тестовых сценариях, или отказываться от использования фаззинг-систем с обратной связью. Кроме этого, поведение описанных выше инструментов не всегда поддается объяснению [5].

Для решения этой проблемы предлагается использовать открытый фреймворк для фаззинг-тестирования, и расширить его функционал с помощью дополнительных модулей.

Существуют готовые opensource фаззер-фреймворки, которые легко поддаются модификации и расширению базового функционала. В качестве примера можно привести SulleyFuzz [6]. Такие фреймворки работают как отдельные приложения и позволяют создавать тестовые сценарии для динамического тестирования без привязки к конкретной платформе и языку программирования, что значительно упрощает процесс интеграции инструмента в рабочие процессы.

После того, как фреймворк для фаззинга будет настроен, предлагается интегрировать в него блок для анализа состояния тестируемого объекта. Так как этот блок будет написан под конкретный продукт, он может анализировать любые метрики. Как пример, это может быть анализатор лог-журналов в реальном времени, который считывает произошедшие события, находит в них ошибки, и отправляет обратную связь в фаззинг-систему. Блок схема описанного взаимодействия представлена на рис. 2.

GreyBox инструмент подключается к тестируемому приложению и начинает отправлять на него данные. Приложение считывает эти данные и обрабатывает. В процессе обработки, дополнительный модуль анализирует состоя-

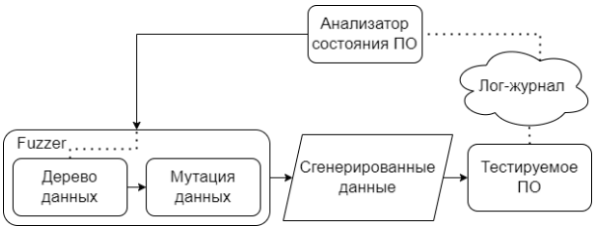


Рис. 2. Блок схема системы

ние системы по ее логам и отправляет положительную или отрицательную обратную связь в фаззер. В зависимости от полученной обратной связи инструмент принимает решение, продолжить мутацию текущего поколения данных или приступить к новому.

Обсуждение

После того, как предложенный модуль будет создан, его необходимо протестировать.

Для сравнения полученных результатов предлагается сравнить два режима работы фаззинг-тестирования: без использования созданной модификации и с ее использованием. Для ускорения процесса тестирования, допускается специально внести ошибки в код, если это возможно. В этом случае, будет возможность сразу понять, какая комбинация данных на входе сможет привести к падению ПО, что позволит провести анализ работы системы в будущем, если в этом будет необходимость. В качестве метрики тестирования можно использовать время, затраченное на нахождение ошибочной комбинации данных. Ожидается, что второй вариант тестирования найдет такую комбинацию быстрее, чем первый.

Еще одной метрикой для анализа может служить количество найденных ошибок. Сбор статистки займет больше времени, чем предыдущий анализ, но с точки зрения тестирования, является не менее важным. На выходе ожидается, что второй вариант инструмента найдет большее количество ошибок чем первый.

Для дальнейшей модификации и развития созданной системы предлагается провести исследование, изучив собранные лог-журналы динамического анализатора и дополнительного модуля. Во время анализа стоит обратить внимание на цепочки данных, построенные инструментом: какие из них вызвали отклик в ПО, а какие были проигнорированы.

По результатам анализа, возможно, понадобится расширить данные, анализируемые через обратную связь, чтобы повысить количество детектируемых ошибок, или изменить алгоритм мутации данных внутри фаззинг-инструмента.

Заключение

Использование внешнего блока для анализа обратной связи предоставит возможность подключить фаззинг-систему к проекту, без внесения изменений в его кодовую базу. Такое решение позволит сэкономить время на этапе внедрения процессов динамического тестирования. При этом внедренная система сможет использовать различные метрики для сбора обратной связи, что должно ускорить процесс нахождения ошибок в продукте.

Рассмотренный вариант модификации фаззинг-фреймворка будет достаточно гибким, и, в случае необходимости, может быть легко модифицирован под новые требования к функционалу. Кроме этого, описанный модуль может использоваться не только для организации «умного» тестирования, но и для анализа состояния продукта и выявлении аномалий в его повседневной работе.

Библиографический список

1. *Веденеев Г. С., Федосеев Д. А., Старовойт К. А.* Анализ инструментов для проведения автоматизированного функционального тестирования программного обеспечения // Теория и практика современной науки. 2017. № 5 (23). P. 166–178.

2. *Васинев Д. А., Соловьев М. В.* Предложения по построению универсального фаззера протоколов // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 6. С. 59–67. DOI:10.31854/1813-324X^023-9-6-59-67.

3. AFLNET. URL: https://github.com/aflnet/aflnet (дата обращения: 25.11.2024).

4. AFLSmart. URL: https://github.com/aflsmart/aflsmart (дата обращения: 25.11.2024).

5. Проблемы AFLSmart. URL: https://habr.com/ru/companies/dsec/articles/492768/ (дата обращения: 27.11.2024).

6. SulleyFuzz. URL: https://github.com/OpenRCE/sulley (дата обращения: 29.11.2024).

УДК 004.056.55 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-77-79**

В. А. Рындюк*
кандидат технических наук, доцент
Я. И. Колодязный*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ. СОВРЕМЕННЫЕ УГРОЗЫ И МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ

В статье рассмотрены актуальные аспекты информационной безопасности радиолокационных станций, проанализированы основные угрозы, связанные с нарушением работоспособности систем радиолокации, в том числе наземных навигационных систем. Проведен анализ известных методов противодействия информационным угрозам. Выделены ключевые подходы к минимизации рисков и рекомендации по повышению устойчивости радиолокационных станций к внешним и внутренним угрозам.
Ключевые слова: *радиолокационные станции, информационная безопасность, угрозы информационной безопасности, методы и средства защиты.*

V. A. Ryndyuk*
PhD, Tech., Associate Professor
Ya. I. Kolodyazny*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INFORMATION SECURITY OF RADIOLOCATION STATIONS. MODERN THREATS AND PROTECTION METHODS

The article discusses current aspects of information security of radiolocation stations, analyzes the main threats associated with the malfunction of radiolocation systems, including ground-based navigation systems. The analysis of known methods of countering information threats is carried out. The key approaches to minimizing risks and recommendations for improving the radiolocation stations resistance to external and internal threats are highlighted.
Keywords: *radiolocation stations, information security, threats to information security, methods and means of protection.*

Радиолокационные станции (РЛС) играют критически важную роль в современных системах управления воздушным движением, наземной навигации, обороне и других сферах. Радиолокационные станции способны выявлять и отслеживать различные объекты, включая беспилотные летательные аппараты (БПЛА), что позволяет своевременно реагировать на потенциальные угрозы. Радиолокационные станции обеспечивают точность и надежность навигации для различных транспортных средств и воздушных судов, а также предоставляют информацию, необходимую для эффективного управления воздушным движением, предотвращая столкновения и обеспечивая безопасность полетов [1].

Их функциональность и работоспособность во многом зависят от уровня информационной безопасности. Несмотря на высокую надежность РЛС, растущая сложность киберугроз и средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) требуют особого внимания к защите данных и сигналов.

Цель настоящей статьи – исследовать основные угрозы информационной безопасности РЛС, проанализировать существующие методы защиты и предложить новые методы для обеспечения бесперебойной работы этих систем.

Рассмотрим основные угрозы информационной безопасности РЛС:

1) Кибератаки на программное обеспечение РЛС. Современные РЛС используют встроенные компьютеры и программное обеспечение для обработки сигналов и данных. Уязвимости в программном обеспечении могут быть использованы злоумышленниками для следующих действий: внедрения вредоносного кода, нарушения обработки сигналов, вывода РЛС из

строя, что может привести к неправильному обмену данными между РЛС и воздушным судном (ВС) и потенциально к катастрофе.

2) Подмена и искажение радиолокационных сигналов (спуфинг) [6]. Направленные атаки на сигналы РЛС могут включать: создание ложных целей, изменение траектории объектов на экранах операторов, нарушение систем наведения и управления, также вызывая ложное информирование пилотов и (или) некорректную работу бортовых систем.

3) Перехват и анализ радиолокационных данных. Использование специализированных средств для перехвата радиолокационного сигнала позволяет получать конфиденциальную информацию о параметрах работы РЛС и ее объектах, что, например, в условиях боевых действий может помочь противнику перехватить инициативу, если информация в той или иной степени имеет стратегическую важность.

4) Атаки средств РЭБ направлены на создание помех или подавление работы РЛС [5]. Среди основных способов: широкополосные и направленные помехи и радиоподавление. Это ведет к потере связи воздушного судна с РЛС, что означает потерю части органов восприятия обстановки вокруг и появление уязвимости судна к столкновению с какими-либо объектами или к атаке врага.

5) Инсайдерские угрозы [9]. Возможность утечки данных или внедрения вредоносного ПО через сотрудников, имеющих доступ к системам РЛС является достаточно опасной угрозой, так как сотрудник, особенно если он имел высокий уровень доступа ко многим системам станции, может надолго вывести РЛС из строя таким образом, что остальные сотрудники могут даже не понять, серьезность возникших проблем, как их исправить или есть вообще какие-либо неисправности.

Приведем перечень основных применяемых методов и средств защиты:

1. Шифрование данных и сигналов [7], что обеспечивает защиту радиолокационных сигналов от перехвата и модификации. Применяются системы асимметричного и симметричного шифрования.

2. Аутентификация сигналов [8]. Использование уникальных цифровых подписей позволяет подтвердить подлинность источника радиолокационного сигнала.

3. Защита программного обеспечения. Данный метод исходит из того, что ПО нуждается в постоянном и регулярном обновлении и проверке на наличие уязвимостей, необходимо использование средств антивирусной защиты, а также контроль доступа к системам через системы многофакторной аутентификации.

4. Противодействие РЭБ [5]. Радиоэлектронная борьба имеет как наступательную сторону, так и оборонительную, которая, как понятно из названия, заключается в использовании методов противодействия радиоэлектронным атакам со стороны противника с целью сохранения целостности своих объектов и систем и продолжения их функционирования в исправном режиме.

Оборонительная сторона РЭБ может включать в себя такие средства, как:

– Усовершенствованные алгоритмы фильтрации помех;

– Мгновенное переключение частот для затруднения подавления сигналов;

– Применения отвлекающих источников излучения для защиты РЛС от помех и иных внешних угроз [2].

5. Обучение и контроль персонала.

Инвестирование в образование специалистов, способных отражать атаки на программное обеспечение РЛС и обеспечивать должный уровень защиты от информационных угроз, а также регулярное повышение квалификации сотрудников является одним из важнейших методов защиты. Кроме того, внедрение строгих протоколов доступа, разделение и минимизация полномочий, контроль за действиями сотрудников уменьшают риски, связанные с человеческим фактором.

В настоящее время во многих сферах, как военных, так и гражданских, активно внедряются системы защиты с использованием искусственного интеллекта (ИИ) и нейронных сетей. Они открывают множество возможностей: от анализа различных угроз и их выявления до непосредственного участия ИИ и нейросетей в мероприятиях по противодействию атак неприятеля. С их помощью, например, можно создавать усовершенствованные программы и алгоритмы по маскировке уязвимых мест систем станции, обработке и передаче данных и т. д. Данные технологии сейчас претерпевают самое стремительное развитие и интеграцию во все аспекты деятельности человека, поэтому с уверенностью можно сказать, что в ближайшее время их функционал будет расширяться и предоставлять еще более широкий спектр возможностей по обеспечению информационной безопасности самых разных систем, в том числе и радиолокационных [4].

Еще одним инновационным методом защиты можно назвать усовершенствованный вид криптографической защиты, а именно кван-

товую криптографию. Квантовая криптография – это технология, использующая принципы квантовой механики для обеспечения безопасности передачи данных. Ее ключевыми особенностями являются принцип неопределенности, гарантирующий обнаружение вмешательства, и квантовая запутанность, обеспечивающая мгновенную связь между частицами. Основное применение технологии – это распределение квантовых ключей, которое делает перехват данных невозможным без выявления вмешательства. Квантовая криптография устойчива к атакам, включая те, что могут быть проведены квантовыми компьютерами [3].

В общем, обеспечение информационной безопасности радиолокационных станций требует комплексного подхода, то есть гармоничного сочетания уже проверенных и надежных методов и средств, а также внедрение новых перспективных решений.

Проанализировав вышеизложенное, целесообразным будет предложить следующие способы обеспечения информационной безопасности РЛС:

1. Развитие систем анализа, выявления угроз и борьбы с ними с использованием технологий ИИ и нейронных сетей.

2. Внедрение современных методов криптографической защиты, таких как квантовая криптография.

Будущее информационной безопасности РЛС тесно связано с внедрением вышеупомянутых инновационных технологий. Это позволит на годы вперед обеспечить высокую устойчивость наземных навигационных систем в условиях стремительно растущих угроз.

Библиографический список

1. *Гончаренко Ю. Ю., Карцан И. Н.* Радиолокационные станции как средство обеспечения безопасности критической информационной инфраструктуры. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/radiolokatsionnye-stantsii-kak-sredstvo-obespecheniya-bezopasnosti-kriticheskoy-informatsionnoy-infrastruktury (дата обращения: 01.12.2024).

2. *Мугинов А. З.* Пассивная защита радиолокационных станций от помех. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=43358998 (дата обращения: 25.11.2024).

3. *Долгочуб Е. А., Поликанин А. Н.* Технологии квантовой криптографии. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-kvantovoy-kriptografii (дата обращения: 02.12.2024).

4. Прогрессивные тенденции применения искусственного интеллекта в области информационной безопасности / А. К. Бекматов [и др.]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/progressivnye-tendentsii-primeneniya-iskusstvennogo-intellekta-v-oblasti-informatsionnoy-bezopasnosti (дата обращения: 02.12.2024).

5. *Ильин А. П., Шакин Д. Н.* К вопросу о месте радиоэлектронной разведки, радиоэлектронной борьбы и радиоэлектронной маскировки в информационной борьбе. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-meste-radioelektronnoy-razvedki-radioelektronnoy-borby-i-radioelektronnoy-maskirovki-v-informatsionnoy-borbe (дата обращения: 02.12.2024).

6. *Черкасов Д. Ю., Иванов В. В.* IP-spoofing. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ip-spoofing (дата обращения: 02.12.2024).

7. Шифрование / Хыонг Лыу Чан Тхи Тхьен [и др.]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/shifrovanie (дата обращения: 01.12.2024).

8. *Иванов В. В., Лубова Е. С., Черкасов Д. Е.* Аутентификация и авторизация. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/autentifikatsiya-i-avtorizatsiya (дата обращения: 01.12.2024).

9. *Шугаев В. А., Алексеенко С. П.* Классификация инсайдерских угроз информации. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-insayderskih-ugroz-informatsii (дата обращения: 02.12.2024).

УДК 004.8:004.056:004.9 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-80-83**

В. А. Рындюк*
кандидат технических наук, доцент
А. Ю. Гордиенко*
студент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АТАК НА IOT-УСТРОЙСТВА

В статье рассмотрены подходы, связанные с применением искусственного интеллекта для защиты IoT-устройств от кибератак на них. Представлены ключевые технологии, включая машинное обучение, глубокое обучение, IDS и автоматизацию защиты, приведены рекомендации по улучшению защиты IoT-систем.
Ключевые слова: *искусственный интеллект, интернет вещей, кибербезопасность IoT, предотвращение кибератак, обнаружение аномалий в IoT.*

V. A. Ryndyuk*
PhD, Tech., Associate Professor
A. Y. Gordienko*
Student
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO PREDICT AND PREVENT ATTACS ON IOT DEVICES

The article discusses approaches related to the use of artificial intelligence to protect IoT devices from cyberattacks. The article presents key technologies, including machine learning, deep learning, IDS and automation of protection, and provides recommendations for improving the protection of IoT systems.
Keywords: *Artificial Intelligence, Internet of Things, IoT Cybersecurity, Cyberattack Prevention, IoT Anomaly Detection.*

Введение

IoT открывает широкие возможности, но с увеличением их использования возрастают киберугрозы. Устройства IoT становятся привлекательной целью для хакеров из-за их слабой защищенности, ограниченных вычислительных ресурсов и недоработанных систем обновления безопасности. Применение искусственного интеллекта (ИИ) помогает своевременно анализировать поведение устройств и выявлять потенциальные угрозы, минимизируя риски для пользователей.

Цель статьи

Основная цель статьи – проанализировать текущие методы применения ИИ для защиты IoT-устройств от атак и предложить пути для их улучшения.

Рассмотрим методы ИИ для обеспечения безопасности IoT-устройств:

1. Машинное обучение для обнаружения аномалий – один из основных инструментов защиты IoT-устройств. Оно анализирует сетевой трафик и выявляет подозрительное поведение, например, резкое увеличение объема передаваемых данных, классифицируя его как аномалию и блокируя активность. Это помогает предотвратить атаки, такие как DDoS, и заражение вредоносным ПО [1].

На практике методы уже активно применяются в системах обнаружения аномалий, таких как Cisco Secure Network Analytics (ранее Stealthwatch) [2] и IBM QRadar [3]. Cisco Secure Network Analytics анализирует сетевую активность, выявляет угрозы (DDoS-атаки, утечки данных) с помощью поведенческого анализа и машинного обучения, что автоматизирует расследование инцидентов. IBM QRadar объединяет

ИИ, поведенческую аналитику и машинное обучение для сбора и анализа сетевых данных, выявляя аномалии и повышая защиту от кибератак.

2. Глубокое обучение и нейронные сети. Методы глубокого обучения позволяют анализировать большие объемы данных и выявлять сложные паттерны атак на IoT. Например, сверточные нейронные сети (CNN) могут в реальном времени анализировать сетевой трафик, обнаруживая подозрительные изменения, такие как подключения к неизвестным серверам. Рекуррентные нейронные сети (RNN) учитывают временные зависимости, эффективно обнаруживая атаки в реальном времени и предсказывая угрозы на основе предыдущих данных [4].

3. Обнаружение вторжений на основе ИИ. Системы обнаружения вторжений (Intrusion Detection Systems, IDS) используют методы ИИ для мониторинга и анализа поведения сети. IDS обучаются на данных о кибератаках и могут выявлять подозрительное поведение, например, несанкционированные попытки доступа к устройству или изменения в настройках сети. Примеры таких систем включают решения на основе программного обеспечения, как, например, Snort, которые используют машинное обучение для обнаружения угроз в реальном времени [4].

4. Автоматизация процессов защиты и реагирования. ИИ также используется для автоматизации процессов защиты и реагирования на угрозы. Например, системы на основе ИИ могут автоматически блокировать подозрительный трафик или уведомлять администраторов о возможных атаках. Это снижает нагрузку на специалистов по безопасности и повышает скорость реакции на угрозы.

Рассмотрим распространенные типы атак на IoT:

– DDoS-атаки – атака на отказ в обслуживании, где множество скомпрометированных устройств (например, камеры видеонаблюдения или умные розетки) направляют трафик на сервер, перегружая его и выводя из строя. Например, ботнет Mirai в 2016 г. скомпрометировал более 600 тыс. устройств [5]. Такие атаки можно предотвращать, анализируя поведение сетевых устройств и выявляя подозрительные изменения с помощью ИИ.

– Взлом систем умного дома – злоумышленники получают доступ к умным замкам, камерам и другим устройствам, что может угрожать приватности, безопасностью и доступом к личной информации.

– Заражение ботнетами. Многие IoT-устройства слабо защищены и могут быть скомпрометированы для создания ботнетов, используемых в атаках.

– Атаки типа «человек посередине» (MitM) – перехват трафика между устройствами или между устройством и сервером, позволяющий злоумышленнику подменять или перехватывать данные.

Приведем сравнительный анализ методов ИИ для обеспечения безопасности IoT-устройств с целью выявления их сильных и слабых сторон, а также потенциальных применений для эффективного предотвращения угроз безопасности.

1. Машинное обучение для обнаружения аномалий.

Имеет такие преимущества, как:

– Быстрое выявление аномалий.

– Эффективность для новых и неизвестных угроз.

– Возможность обучения на реальных данных.

Но обладает недостатками, такими как:

– Возможны ложные срабатывания.

– Требуются большие объемы данных для обучения.

Применяется в таких направлениях, как:

– Мониторинг IoT-устройств.

– Выявление потенциальных угроз в сети устройств.

2. Глубокое обучение и нейронные сети. Модели глубокого обучения применяются для анализа сложных данных и выявления паттернов угроз.

Имеет такие преимущества, как:

– Высокая точность распознавания угроз.

– Способность к самообучению.

– Эффективность при работе с большими данными.

Но обладает недостатками, такими как:

– Высокая вычислительная нагрузка.

– Сложность объяснения принятых ИИ решений (проблема прозрачности).

– Дорогостоящая инфраструктура.

Применяется в таких направлениях, как:

– Анализ видеоданных с камер.

– Обнаружение продвинутых угроз.

– Работа с большими и сложными данными.

3. Обнаружение вторжений (IDS) на основе ИИ. Системы IDS с интеграцией ИИ отслеживают подозрительную активность в сети и выявляют попытки взлома и вторжения.

Имеет такие преимущества, как:

– Высокая точность обнаружения атак.

– Быстрое реагирование на инциденты.

– Подходит для защиты сетевого периметра.

Но обладает недостатками, такими как:

– Необходимость частого обновления данных и моделей.
– Не всегда справляется с зашифрованным трафиком.
– Требуется настройка и калибровка для конкретной среды.

Применяется в таких направлениях, как:
– Защита периметра IoT-сети.
– Мониторинг сетевого трафика.
– Выявление подозрительных сетевых активностей.

4. Автоматизация процессов защиты и реагирования. Данный метод включает автоматическое выявление угроз и реагирование на инциденты, изоляцию зараженных устройств и уведомление операторов о возможных угрозах.

Имеет такие преимущества, как:
– Быстрое реагирование на угрозы.
– Снижение нагрузки на команду безопасности.
– Минимизация человеческого фактора.

Но обладает недостатками, такими как:
– Возможны ложные срабатывания.
– Требуется адаптация для новых типов угроз.

Применяется в таких направлениях, как:
– Удаленное управление устройствами.
– Мгновенное реагирование на атаки.
– Обеспечение безопасности в сложных сетевых средах.

В результате сравнения мы можем сказать, что каждый метод ИИ для безопасности IoT имеет свои плюсы и минусы. Машинное обучение и IDS показывают эффективность до 95% в выявлении угроз, но первое склонно к ложным срабатываниям, а второе требует детальной настройки. Глубокое обучение дает высокую точность и лучше справляется с большими данными, но требует значительных ресурсов. Автоматизация ускоряет реагирование и снижает нагрузку, хотя нуждается в мерах для уменьшения ложных срабатываний.

На основе этих выводов разработаем некоторые предложения и рекомендации:

1. Касательно гибридных моделей защиты. Это подход, сочетающий традиционные методы обнаружения угроз на основе сигнатур с анализом аномалий, часто с использованием искусственного интеллекта. Разработка гибридных систем, которые объединяют методы машинного обучения и глубокого обучения, может значительно повысить точность в обнаружении атак на IoT-устройства. Например, сочетание моделей, которые эффективно анализируют базовые паттерны сетевого трафика с помощью машинного обучения, и моделей, способных выявлять сложные закономерности через глубокое обучение, позволит повысить скорость обнаружения угроз и снизить количество ложных срабатываний. Конкретные цифры по скорости обнаружения угроз в гибридных моделях защиты варьируются в зависимости от используемых алгоритмов и архитектуры системы, но общая тенденция показывает значительное ускорение по сравнению с традиционными методами. Гибридные системы могут более эффективно обрабатывать большие объемы данных, характерные для IoT-сетей, и быть полезны для различных типов устройств, от простых датчиков до сложных интеллектуальных систем.

2. Рассмотрим анализ зашифрованного трафика. Этот подход подразумевает выявление потенциальных угроз в трафике, без непосредственной расшифровки самих данных. С ростом требований к конфиденциальности данных увеличивается использование шифрования в IoT-сетях. Однако это создает проблему для систем безопасности, поскольку традиционные методы анализа трафика не могут напрямую интерпретировать зашифрованные данные. Развитие методов анализа зашифрованного трафика с применением ИИ позволит выявлять аномалии даже в зашифрованных данных без нарушения конфиденциальности. Например, поведенческие модели ИИ могут анализировать метаданные и паттерны трафика, не расшифровывая сами данные, что позволит обнаруживать подозрительную активность и предотвращать угрозы, такие как атаки типа «человек посередине».

3. В окончании рассмотрим интеграцию ИИ с аппаратными решениями. Интеграция ИИ с аппаратными решениями для кибербезопасности IoT подразумевает использование интеллектуальных алгоритмов в сочетании с аппаратными средствами для усиления защиты данных и предотвращения угроз. Например, концепция AIoT предполагает, что ИИ встроен в устройства для мониторинга и адаптации безопасности в реальном времени. Примеры включают аппаратные брандмауэры с ИИ и локальную защиту данных, которые позволяют блокировать подозрительный трафик и минимизировать передачу данных в облако. Такие решения, как от Lenovo и Nothreat, демонстрируют, как ИИ может улучшить защиту данных и снизить потребность в пользовательском вмешательстве [8].

Заключение

Отметим, что в данной статье рассмотрены основные вызовы и современные подходы обе-

спечения безопасности IoT-устройств с использованием искусственного интеллекта. Был проведен анализ технологий, которые позволяют эффективно обнаруживать аномалии и предотвращать различные виды атак. Сравнительный анализ методов выявил их сильные и слабые стороны, а также определил области для улучшений. Предложенные рекомендации направлены на повышение точности и скорости выявления угроз, а также на усиление защиты IoT-устройств в условиях современных киберугроз.

Библиографический список

1. *Андреев М. Д., Захарова О. И.* Методы машинного обучения для обнаружения аномалий // Научный лидер. 2024. № 32 (182).

2. Cisco Secure Network Analytics Overview and Notes. URL: https://community.cisco.com/t5/security-knowledge-base/cisco-secure-network-analytics-overview-and-notes/ta-p/4775568 (дата обращения: 10.10.2024).

3. Outsmart attacks with a connected, modernized security suite. URL: https://www.ibm.com/qradar (дата обращения: 10.10.2024).

4. *Бекматов А. К., Рустамов Т. С.* Роль глубокого обучения в улучшении точности систем обнаружения вторжения // Экономика и социум. 2024. № 6-1 (121).

5. БОТНЕТ MIRAI. URL: https://botfaqtor.ru/blog/mirai/ (дата обращения: 12.10.2024).

6. Как ИИ кибербезопасность усиливает: новые тренды и возможности наукоемкие технологии. URL: https://habr.com/ru/companies/neuronet/articles/645539/ (дата обращения: 17.10.2024).

7. *Костин Д. В., Шелухин О. И.* Сравнительный анализ алгоритмов машинного обучения для проведения классификации сетевого зашифрованного трафика // T-Comm. 2016. №9. С. 43–52.

8. Nothreat и Lenovo выводят безопасность устройств IoT на новый уровень с помощью решений на основе искусственного интеллекта // INFO City. URL: https://infocity.tech/2024/09/nothreat-i-lenovo-vyvodjat-bezopasnost-ustrojstv-iot-na-novyj-uroven-s-pomoschju-reshenij-na-osnove-iskusstvennogo-intellekta/ (дата обращения: 18.10.2024).

УДК 004.658 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-84-86**

В. А. Ушаков*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

В предлагаемой статье представлен обзор российского рынка систем управления базами данных и инструментов обработки данных, структура рынка и прогноз его развития до 2030 г. Кроме того, приведены технологические тренды, определяющие развитие мирового рынка систем управления базами данных и инструментов обработки данных, основные системы управления базами данных, их описания и направления развития, основные этапы динамики рынка.
Ключевые слова: *управление данными, обработка данных, система управления базами данных, СУБД, текущее состояние, перспективы развития.*

V. A. Ushakov*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DATA CONTROL AND PROCESSING IN THE RUSSIAN FEDERATION: CURRENT STATUS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

The proposed article presents an overview of the Russian market for database management systems and data processing tools, the market structure and its development forecast until 2030. In addition, technological trends are presented, determining the development of the world market of database management systems and data processing tools, basic database management systems, their description and directions of development, main stages of market dynamics.
Keywords: *data management, data processing, database management system, DBMS, current state, development prospects.*

Введение

За последние два года объем создаваемых данных, увеличился со 120 до 180 зеттабайт, то есть в 1,5 раза. При этом, как несложно посчитать, ежедневно генерируется примерно 300 млн терабайт данных и информации. Именно этим и обусловлен рост популярности инструментов для обработки данных, что в свою очередь ускоряет развитие систем управления базами данных (СУБД). В статье предлагается рассмотреть

Обзор российского рынка систем управления базами данных и инструментов обработки данных

На мировом и российском рынках СУБД и инструментов обработки данных происходит развитие по следующим направлениям, обусловленное рядом технологических факторов, а именно:

1) *цифровая трансформация* [1]. Развитие и увеличение количества мобильных устройств приводит к повышению объема данных, нуждающихся как в хранении, так и в обработке;

2) *искусственный интеллект (ИИ)* [2] *и машинное обучение*. Создание спроса на эффективные инструменты работы с данными вызвано распространением интеллектуальных помощников в различных сферах;

3) *интернет вещей (IoT)* [4, 5] *и промышленный интернет вещей (IIoT)*. Необходимы программные инструменты для аналитической обработки данных;

4) *распространение облачных технологий*. Возможность использовать решения по управлению данными в любой точке планеты, где есть доступ в интернет и с любого устройства – ноутбук, планшет, смартфон и т. д.

На российском рынке можно выделить еще и следующие тренды:

1) решение задачи импортозамещения путем разработки отечественного программного обеспечения;

2) цифровизация всех отраслей экономики;

Таблица 1

Категории СУБД [8]

Категория СУБД	Описание	Направления развития
Общего назначения	СУБД, созданные на основе СУБД с открытым исходным кодом PostgreSQL и Firebird и продукты семейства ЛИНТЕР	– Развитие инструментов мониторинга и управления работой СУБД – Развитие функционала СУБД для работы из облака – Разработка аппаратно-программных комплексов, включающих СУБД данного типа
Аналитические	СУБД, созданные на основе СУБД с открытым исходным кодом Greenplum и ClickHouse	– Развитие функционала СУБД для работы из облака – Включение в СУБД элементов ИИ
Платформа Hadoop и СУБД на ней	Продукты, разработанные на основе проекта с открытым исходным кодом Hadoop	Развитие функционала безопасности данных, инструментов администрирования, функционала работы в облаке
Резидентные (In-memory)	СУБД, размещаемые в оперативной памяти компьютера	– Адаптация СУБД данного типа под решение аналитических задач; – Переход на отечественные решения; – Разработка отраслевых аппаратно-программных комплексов
Прочие	Документные и графовые СУБД	Повышение интенсивности работы с ИИ в векторных СУБД

3) переход госкорпораций на отечественное ПО к 2030 г.

Структура рынка систем управления базами данных и инструментов обработки данных

В табл. 1 представлены основные СУБД, их описания и тренды развития.

Распределение СУБД по занимаемой доле рынка представлено на рис. 1.

Прогноз развития систем управления базами данных и инструментов обработки данных до 2030 г.

Реестр российского ПО был создан в 2016 г., куда активно включается отечественное программное обеспечение и, в частности, СУБД и инструменты обработки данных. Это позволяет решать задачу импортозамещения.

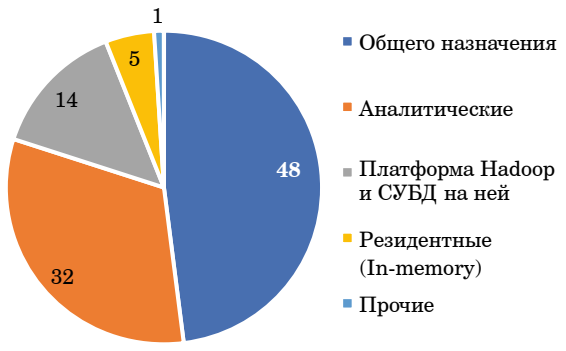


Рис. 1. Структура рынка в разрезе типов СУБД в 2024 г., %

Предполагается, что развитие в сфере проектирования и разработки СУБД и инструментов обработки данных будет идти следующими этапами до 2030 г.:

Развитие: 2025 г. Решение задачи импортозамещения в сфере проектирования и разработки СУБД и инструментов обработки данных.

Достижение зрелости: 2026–2027 гг. «Будет достигнут высокий уровень зрелости отечественных решений с широким покрытием базовых потребностей заказчиков в СУБД, растет интерес к дополнительным инструментам обработки данных. Ожидается появление передовых технически развитых российских продуктов» [8].

Стабилизация: 2027–2030 гг. «Рынок возвращается к общемировой динамике роста. Данный рост будет обусловлен усиленной цифровизацией ключевых отраслей экономики, реализацией государственной политики цифровой трансформации и переходом к экономике данных, высоким уровнем зрелости российских продуктов» [8].

Заключение

Развитие отечественных СУБД и инструментов обработки данных продолжится со скоростью 20% в год до 2030 г. Это в свою очередь позволит решить задачу импортозамещения. Будет оказано положительное влияние на проект Экономика данных [9] и переход к ней от Циф-

ровой экономики [10]. В целом, в России продолжится курс на развитие цифровых технологий.

Библиографический список

1. *Ватолкина Н. Ш.* Управление качеством в сфере услуг в условиях цифровой трансформации экономики. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. 179 с.

2. *Григорьева Е. Д.* Применение технологии искусственного интеллекта в метеорологии // Прикладной искусственный интеллект: перспективы и риски: Сб. докл. (Санкт-Петербург, 17 октября 2024 г.). СПб: ГУАП, 2024. С. 234–235.

3. *Григорьева Е. Д.* Разработка аппаратно-программного комплекса «умного» производства с применением технологии искусственного интеллекта // Прикладной искусственный интеллект: перспективы и риски: Сб. докл. (Санкт-Петербург, 17 октября 2024 г.). СПб: ГУАП, 2024. С. 37–39.

4. *Колесник П. Д.* Перспективы Интернета вещей как инструмента цифровой экономики // Хроноэкономика. 2019. № 1(14). С. 53–58.

5. *Григорьева Е. Д.* Проектирование системы «Умное производство» // Молодежная неделя науки института промышленного менеджмента, экономики и торговли: Сб. трудов (Санкт-Петербург, 27 ноября – 02 декабря 2023 г.). СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. С. 106–108.

6. *Константинова Т., Сафаров Э. А.* Обзор отечественных графовых баз данных и их внедрение // Молодежная неделя науки института промышленного менеджмента, экономики и торговли: Сб. трудов. СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024.

7. *Горбачёва Д. А., Подтелок П.* Применение графовых баз данных в интернете вещей // Молодежная неделя науки института промышленного менеджмента, экономики и торговли: Сб. трудов. СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024.

8. Рынок систем управления и обработки данных в России: текущее состояние и перспективы развития, ЦСР. URL: https://ai.gov.ru/knowledgebase/tekhnologii-ii/2024_rynok_sistem_upravleniya_i_obrabotki_dannyh_v_rossii_tekuschee_sostoyanie_i_perspektivy_razvitiya_csr/?ysclid=m4osfk8duj64294520 (дата обращения: 05.12.2024).

9. Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. В России появится новый нацпроект – «Экономика данных». URL: https://digital.gov.ru/ru/events/45686/ (дата обращения: 02.12.2024).

10. Цифровая экономика: 2022: краткий статистический сборник / Г. И. Абдрахманова [и др.]. М.: НИУ ВШЭ, 2022. 124 с. DOI: 10.17323/978-5-7598-2599-9.

УДК 004.9.62.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-87-90**

С. Г. Фомичева*
кандидат технических наук, профессор
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

УСИЛЕНИЕ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТИ ПРИ РАСПРЕДЕЛЕННОМ МАШИННОМ ОБУЧЕНИИ

Для распределенного селективного машинного обучения предложен алгоритм усиления конфиденциальности с использованием шумовой дифференциальной конфиденциальности обучающих данных. Приведены результаты оценки производительности сетей с прямым распространением сигнала при обучении предложенным алгоритмом.
Ключевые слова: *информационная безопасность, машинное обучение, дифференциальная конфиденциальность.*

ENHANCED PRIVACY IN DISTRIBUTED MACHINE LEARNING

S. G. Fomicheva*
PhD, Tech., Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

The algorithm for distributed selective machine learning using differential confidentiality of training data is proposed. The results of evaluating the performance of networks with direct signal propagation during training with the proposed algorithm are presented.
Keywords: *information security, machine-learning, differential confidentiality.*

В современном мире технологии искусственного интеллекта стали де-факто сквозной технологией большинства отраслей экономики, ускоряя их развитие, улучшая качество и скорость разработки корпоративного программного обеспечения. Однако любая новая технология, кроме очевидных преимуществ, привносит целых спектр до конца неосознанных опасений и угроз. В частности, обеспечение информационной безопасности при интеллектуальной обработке должно быть обеспечено на всем жизненном цикле информации, а именно, на этапе ее хранения (at rest), на этапе ее передачи (in transit) и на этапе ее обработки (in use). Основными решениями, которые способны обеспечить защиту информации на этапе ее обработки, являются технологии безопасных вычислений (secure computation), относящиеся к машинному обучению с обеспечением конфиденциальности (Privacy-Preserving Machine Learning, PPML).

Целесообразность применения того или иного метода PPML зависит от многих факторов, таких как уровень ML-зрелости ИСиС, их архитектура, тип используемого машинного обучения и т. п. Среди основных типов архитектур ML-систем, определяемых способом обучения ML-модели, выделяют [1]:

1. Автономное (локальное) обучение.
2. Централизованное обучение.
3. Обучение на базе делегатов (Delegation-based Learning).
4. Распределенное селективное SGD обучение (Distributed Selective SGD).
5. Федеративное обучение (Federated Learning).
6. Передача знаний (Knowledge Transfer).
7. Гибридные архитектуры.

В данной работе используется архитектура Distributed Selective SGD (рис. 1).

Распределенное селективное обучение (Distributed Selective SGD, DSSGD) – метод совместного машинного обучения, который позволяет обучать модель одновременно для разных пользователей. При этом обучающие данные распределяются по нескольким децентрализованным устройствам и не передаются в открытом виде на агрегирующие устройства (системы централизованного хранения). По каналам связи передается часть параметров модели (градиенты). Сервер выполняет функции синхронизации обновления градиентов при об-

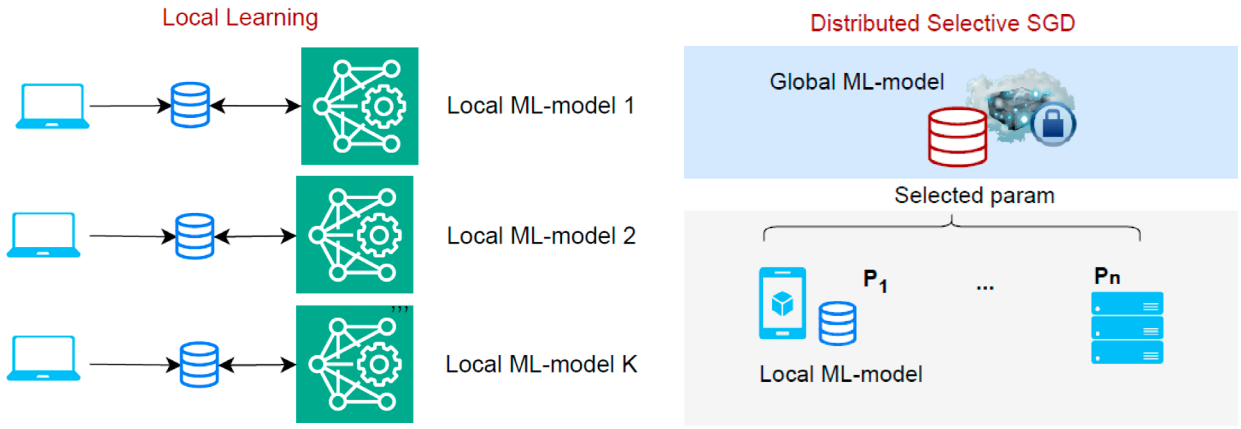


Рис. 1. Архитектуры систем машинного обучения:
а – автономная (локальная), б – распределенная селективная)

учении глобальной модели. При таком подходе совместное обучение моделей гарантирует, что конфиденциальные данные пользователей остаются на локальных устройствах.

Архитектура DSSGD (рис. 1, *б*) состоит из нескольких ключевых компонентов: клиенты – отдельные держатели данных, которые обучают локальные модели, используя свои частные наборы данных; центральный (доверенный) сервер – объединяет обновления локальных моделей для уточнения глобальной модели.

Обычно процесс DSSGD состоит из следующих этапов [1, 2]:

– Инициализация: глобальная модель инициализируется на сервере.

– Распределение данных: данные разбиваются на фрагменты (или генерируются независимо) и распределяются среди клиентов.

– Локальное обучение: каждый клиент обучает свою локальную модель на своих данных.

– Обновления моделей: клиенты отправляют выборочные обновления градиентов SGD своих моделей обратно на сервер.

– Агрегация: сервер агрегирует эти обновления градиентов SGD для улучшения глобальной модели.

Этот итерационный процесс продолжается до тех пор, пока глобальная модель не достигнет желаемой точности.

Основные преимущества распределенного селективного обучения, следующие [3]:

– Конфиденциальность данных: DSSGD позволяет проводить обучение моделей без необходимости централизации конфиденциальных данных, тем самым сводя к минимуму риск утечки данных. При этом размер и динамика локальных наборов данных являются конфиденциальными, и в каждом раунде DSSGD могут использоваться разные выборки данных для обновления градиентов. Участники также могут в любое время удалить свои обучающие данные.

– Децентрализованное обучение: каждое устройство вносит свой вклад в процесс обучения модели, гарантируя, что данные остаются локальными и безопасными.

– Эффективность: Уменьшая необходимость в передаче данных, FL может привести к более быстрому обновлению моделей и повышению производительности в приложениях реального времени.

Однако внедрение DSSGD в интеллектуальные системы сопряжено с рядом проблем [4]:

1. Неоднородность данных: разные устройства могут иметь разное качество и типы обучающих данных, что усложняет процесс обучения.

2. Безопасное агрегирование: обеспечение безопасного агрегирования обновлений градиентов моделей с различных устройств имеет решающее значение для предотвращения утечки данных, что требует наличия доверенного сервера.

3. Ограничения ресурсов: устройства часто имеют ограниченную вычислительную мощность и пропускную способность, что может повлиять на эффективность обучения.

Следует отметить, что участники совместного обучения могут косвенно раскрыть некоторую информацию о своих обучающих наборах данных, публично обновляя часть градиентов во время обучения. Каждый участник полностью контролирует, какими градиентами делиться, и может решить не делиться особо важными. Более того, каждый участник делится лишь малой частью своих градиентов – от 1 до

10%, и тем не менее по-прежнему обеспечивает значительно большую точность, чем обучение только на локальных данных. Несмотря на это, для усиления конфиденциальности в данной работе используется дифференциальная конфиденциальность для наиболее чувствительных градиентов, например, таких как выявленные в ходе высокопроизводительных вычислений градиенты слоев с латентными переменными, соединяющих кодирующую и декодирующую составляющие вариационных автоэнкодеров [5].

При использовании дифференциальной конфиденциальности избирательно добавляется шум к чувствительным (в точки зрения конфиденциальности) градиентам обновлений модели, обеспечивая тем самым дополнительный уровень безопасности.

В формальном виде вычисление обеспечивает дифференциальную конфиденциальность, если для двух наборов данных D и D', различающихся одним сэмплом, выполняется неравенство (1):

$$\Pr\left\{f\left(D\right)\in O\right\}\le \exp\left(e\right)\cdot \Pr\left\{f\left(D'\right)\in O\right\}, \qquad (1)$$

где e – параметр, называемый бюджетом конфиденциальности, O – вывод (результат) функции f.

При DSSGD функция f вычисляет градиенты параметров и выбирает, какими из них поделиться с другими участниками совместного обучения. Существует два источника потенциальной утечки: способ выбора градиентов для совместного использования и фактические значения общих градиентов. Для устранения обоих типов утечки в данной работе используется метод разреженных векторов [6, 7], чтобы:

– случайным образом выбрать небольшое подмножество градиентов, значения которых превышают пороговое значение;

– совместно использовать возмущенные значения выбранных градиентов, все в рамках согласованного дифференциально частного механизма.

Пусть общий бюджет конфиденциальности для каждого периода DSSGD для каждого участника i равен e. Разделим этот бюджет на c частей, где c – общее количество градиентов, которые предполагается загрузить в каждую эпоху (т. е. $c=\theta_u\left|\Delta\mathbf{w}\right|$). Бюджет для каждой потенциальной загрузки затем разделим на две неравные части $e=e_1+e_2$, например, $e_1=(n\text{-}1)/n$, $e_2=1/n$, где n – число градиентов обновления локальной модели; Первая часть e_1 будет использована для проверки того, превышает ли градиент $\Delta w_j^{(i)}, j=1...n$ случайно выбранного параметра j пороговое значение. Вторая часть e_2 используется для фактической загрузки градиента, если он превышает пороговое значение τ. Будем использовать механизм Лапласа для добавления шума r_τ во время выбора и r_w во время загрузки градиентов в соответствии с выделенными бюджетами на конфиденциальность. Уровень шума зависит от бюджета конфиденциальности, а также от чувствительности градиента к каждому параметру.

Тогда алгоритм DSSGD с дифференциальной конфиденциальностью можно записать в следующем виде:

Шаг 1. Для $x\in D$ установить $\sigma\left(x\right)=\dfrac{2c\Delta f}{x}$.

$\Delta f=\max_{D,D'}\left\|f(D)-f(D')\right\|$.

Шаг 2. Сгенерировать шум $r_\tau \sim \mathrm{Lap}\left(\sigma\left(e_1\right)\right)$.

Шаг 3. Случайно выбрать градиент $\Delta w_j^{(i)}$.

Шаг 4. Сгенерировать шум $r_w \sim \mathrm{Lap}\left(2\sigma\left(e_1\right)\right)$.

Шаг 5. Если $\left|bound\left(\Delta w_j^{(i)},\gamma\right)\right|+r_w\ge\tau+r_\tau$, тогда.

– Сгенерировать шум $r'_w \sim \mathrm{Lap}\left(\sigma\left(e_2\right)\right)$.

– Загрузить $\left|bound\left(\Delta w_j^{(i)}+r'_w,\gamma\right)\right|$ на сервер.

– Изменить параметр бюджета конфиденциальности e/c.

– Если количество загруженных градиентов равно c, то останов. Иначе перейти к шагу 2.

Иначе перейти к шагу 3.

Следует обратить внимание, что r_τ не генерируется повторно после неудачной проверки порогового значения. Это гарантирует не только то, что все общие градиенты являются конфиденциальными, но и то, что «штраф» за конфиденциальность не взимается за градиенты, которые слишком малы, чтобы их можно было использовать совместно с другими участниками.

В данной работе усиление конфиденциальности проводилось для градиентов слоя латентных переменных вариационного декодера (VAE AutoBlade), используемого в работе [5]. На рис. 2 отображена динамика метрики RMSE при использовании предложенного алгоритма для разных значений бюджета конфиденциальности. На графике использованы следующие обозначения N=10 – число локальных клиентов в совместном обучении, θ_u выделено разным цветом и принимает значения 1, 0.1, 0.01, 0,001; τ =1E-4, γ =1E-3.

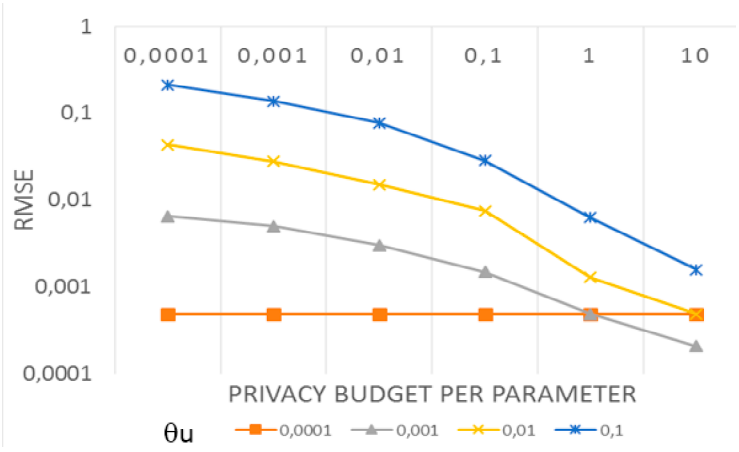


Рис. 2. Оценка RMSE при разном уровне бюджета конфиденциальности

В ходе экспериментов выявлено (рис. 2), что меньшие значения бюджета (privace budget per parameter), т. е. более строгие дифференциальные требования конфиденциальности, приводят к ухудшению RMSE. Однако при увеличении количества участников совместного обучения (N>>10), когда участники разделяют значительную часть своих градиентов, RMSE с улучшенной конфиденциальностью DSSGD ниже, чем RMSE при автономном (локальном) обучении.

Библиографический список

1. *Wu W., Homsi S., Zhang Y.* (2024). Confidential and Verifiable Machine Learning Delegations on the Cloud // Garcia-Alfaro, J., Kozik, R., Choraś, M., Katsikas, S. (eds) Computer Security – ESORICS 2024. ESORICS 2024. Lecture Notes in Computer Science, vol 14983. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-70890-9_10 (дата обращения: 30.11.2024).

2. *Фомичева С. Г., Беззатеев С. В.* Механизмы защиты моделей машинного обучения от состязательных атак // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 10. С. 28–42.

3. *Shokri R., Shmatikov V.* (2015). Privacy-Preserving Deep Learning. 10.1145/2810103.2813687. URL: https://www.researchgate.net/publication/281286964_Privacy-Preserving_Deep_Learning (дата обращения: 30.11.2024).

4. *Беззатеев С. В., Жемелев Г. А., Фомичева С. Г.* Исследование производительности платформ AutoML при конфиденциальных вычислениях // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2024. № 3 (61). С. 109–126.

5. *Жемелев Г. А.* Автоматический синтез трехмерных форм лопаток газовых турбин с помощью методов машинного обучения // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2024. № 2 (59). С. 152–168.

УДК 004.9.62 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-91-94**

С. Г. Фомичева*
кандидат технических наук, профессор
Г. А. Жемелев**
аспирант
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
*** Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого*

СЕЛЕКТИВНОЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЕ ОБУЧЕНИЕ АВТОЭНКОДЕРОВ

Предложен протокол селективного обучения автоэнкодеров, позволяющий повысить конфиденциальность обучающих данных и снизить накладные коммуникационные расходы при распределенном машинном обучении глубоких моделей. Приведены сравнительные результаты оценки производительности автоэнкодеров при автономном, централизованном и распределенном селективном обучении.
Ключевые слова: *распределенное машинное обучение, селективное обучение, автоэнкодер, повышение конфиденциальности данных.*

S. G. Fomicheva*
PhD, Tech., Professor
G. A. Zhemelev **
PhD Student
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
*** Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

DISTRIBUTED SELECTIVE TRAINING OF AUTOENCODERS

A protocol for selective training for autoencoders is proposed. It allows increasing the confidentiality of training data and reducing overhead communication costs for distributed machine learning of deep models. Comparative results of evaluating the performance of autoencoders in autonomous, centralized and distributed selective training are presented.
Keywords: *distributed machine learning, selective learning, autoencoder, data privacy enhancement.*

Современные технологии трехмерного проектирования сложных механизмов активно используют машинное обучение на этапах прототипирования 3D-форм конструктивных элементов и последующего моделирования их функциональности в различных средах окружения. Модели машинного обучения (ML-модели) при этом строятся на глубоких архитектурных основах (deep baseline), например, таких как автоэнкодеры [1]. В ходе распределенного обучения подобных моделей возникает ряд проблем, связанных как с обеспечением информационной безопасности, так и с необходимостью высоких требований к пропускной способности каналов связи.

Проблемы обеспечения информационной безопасности касаются требований конфиденциальности данных, используемых при обучении ML-модели [2]. Магистральными направлениями решения этих проблем являются методы конфиденциальных и защищенных распределенных вычислений, а также методы повышения конфиденциальности на базе архитектурных решений. К числу последних относятся, в частности, методы распределенного селективного обучения, применяемые в данной работе.

Автономное обучение автоэнкодеров в силу ограниченности объемов и специфических особенностей распределения обучающих данных часто приводит к переобучению ML-модели, что отрицательно сказывается на ее способности к обобщению. В свою очередь, большое число параметров автоэнкодеров при централизованном (удаленном) обучении приводит к необходимости передачи по каналам связи данных большого объема, что, во-первых, также, как и при федеративном обучении сводится к большим коммуникационным накладным расходам [3]. Во-вторых, требуется обеспечить конфиденциальность обучающих данных и на этапе их передачи, и на этапе их обработки на серверной стороне, так как поставщики данных и

поставщики вычислительных услуг могут доверять (или не доверять) друг другу в разной степени [4].

В данной работе предлагается адаптированный для автоэнкодеров протокол селективного распределенного обучения. Предлагаемый протокол базируется на том, что распределение параметров ML-модели при обучении является эффективным, поскольку алгоритмы стохастического градиентного спуска, лежащие в основе обучения автоэнкодеров, могут быть распараллелены и выполняться асинхронно. Архитектуры локальных (на стороне клиентов) ML-моделей и глобальной (на стороне доверенного сервера) ML-модели идентичны. При этом распределенное обучение глобальной ML-модели на стороне (доверенного) сервера устойчиво к локальным искажениям (случайным и злонамеренным) обучающих данных клиентов, а также позволяет в ходе обучения подключать новых и отключать (при необходимости) текущие локальные ML-модели. В то же время обновление небольшой части параметров значениями, полученными от других ML-моделей, позволяет каждой локальной ML-модели избежать локальных минимумов в процессе поиска оптимальных параметров. Параметр управления общим доступом может быть настроен таким образом, чтобы обеспечить баланс между объемом передаваемой информации и производительностью получаемых в ходе совместного обучения автоэнкодеров.

Данная работа основана на последних достижениях в области распараллеливания процессов глубокого обучения, в частности, используется распараллеливание процесса стохастического градиентного спуска на кластеры GPU/CPU [5].

Введем ряд обозначений. Пусть кодирующая часть автоэнкодера, являющегося полносвязной нейронной сетью с прямым распространением сигнала и состоит из k-слоев. Слой с номером k, является слоем логгитов автоэнкодера и представлен m-латентными переменными. Выходные данные слоя k соответствуют абстрактным искомым латентным переменным, полученным с помощью модели, и используемыми в качестве входных сигналов для декодирующей части автоэнкодера. Пусть E – функция ошибки вида RMSE, т. е. среднеквадратическое отклонение между истинным значением целевой функции и вычисленным результатом сети, которую в ходе обучения следует минимизировать.

Вектор нейронов $\mathbf{a}_k$ в слое k равен $\mathbf{a}_k = f\left(W_k \mathbf{a}_{k-1}\right)$, где f – функция активации (например, сигмоид или ReLU), W_k – матрица весов нейронов кодирующей составляющей автоэнкодера. Тогда правило обновления в соответствии с алгоритмом стохастического градиентного спуска (Stochastic Gradient Descent, SGD) для параметра w_j имеет вид:

$$w_j := w_j - \alpha \frac{\partial E_i}{\partial w_j}, \qquad (1)$$

где α – параметр скорости обучения, E_i вычисляется по i-ому мини-пакету размера M.

Поскольку каждый параметр в (1) в векторе w обновляется независимо от других параметров, то это позволяет выполнять распараллеливание процесса SGD. Исходя из этого предлагаемый протокол селективного распределенного обучения учитывает, что:

1) обновления различных параметров в ходе SGD по своей сути независимы;

2) разные наборы обучающих данных влияют на разные параметры автоэнкодера;

3) разные характерные признаки (features) и логгиты в разной степени влияют на целевую функцию.

Основная идея, лежащая в основе предлагаемого протокола селективного обновления параметров, заключается в том, что в ходе SGD латентные переменные слоя k вносят гораздо больший вклад в целевую функцию автоэнкодера и, таким образом, подвергаются гораздо большим обновлениям в течение итерации обучения (1). При этом выбор параметров слоя латентных переменных при обновлении может быть совершенно случайным. Предлагаемый протокол (Протокол DSL_of_AE) включает следующие этапы:

Инициализация. Инициализировать параметры $W^{(i)}$ и α-скорость обучения.

Селективное обучение. Выполнять цикл до тех пор, пока не будет получен целевой минимум loss-функции

Шаг 1. Загрузить требуемую выборку $\left|\mathbf{w}_k^{(i)}\right|$ параметров-логгитов слоя k в соответствии с гиперпараметры автоэнкодера θ_d.

Шаг 2. Запустить SGD на локальном датасете и обновить локальные параметры $\mathbf{w}_k^{(i)}$ в соответствии с (1)

Шаг 3. Вычислить вектор градиентов $\Delta\mathbf{w}_k^{(i)}$, который является вектором изменений всех локальных параметров, вычисленных в ходе SGD на стороне клиента.

Шаг 4. Загрузить на доверенный сервер параметры-логгиты $\left[\Delta\mathbf{w}_k^{(i)}\right]_S$, где S – набор индексов градиентов слоя k, выбранных клиентом

Таблица

Оценка RMSE при разных подходах обучения ML-модели

ML-модель	Способ обучения	Средние RMSE на обучающей выборке	Средние RMSE на валидационной выборке
AutoBlade (n=16, u=16, M = 1)	Автономный (локальный)	0,461 E-2	0,556 E-2
	Централизованный (удаленный)	0,343 E-3	0,543 E-3
	Распределенный	0,402 E-3	0,481 E-3
	Распределенный селективный	0,417 E-3	0,486 E-3
AutoBlade (n=16, u=10, M = 1)	Автономный (локальный)	0,522 E-2	0,562 E-2
	Централизованный (удаленный)	0,113 E-3	0,145 E-3
	Распределенный	0,177 E-3	0,481 E-3
	Распределенный селективный	0,157 E-3	0,609 E-3
AutoBlade (n=16, u=16, M = 32)	Автономный (локальный)	0,212 E-1	0,222 E-1
	Централизованный (удаленный)	0,854 E-2	0,863 E-2
	Распределенный	0,899 E-2	0,881 E-2
	Распределенный селективный	0,867 E-2	0,883 E-2
AutoBlade (n=16, u=10, M = 32)	Автономный (локальный)	0,212 E-1	0,222 E-1
	Централизованный (удаленный)	0,854 E-2	0,863 E-2
	Распределенный	0,899 E-2	0,881 E-2
	Распределенный селективный	0,901 E-2	0,912 E-2

либо случайно, либо S-наибольших в предварительно ранжированном порядке (критерий отбора фиксирован на весь период обучения).

Завершение обучения. Сохранить обученную локальную ML-модель автоэнкодера $\theta \times \left|\mathbf{W}^{(i)}\right|$, где θ – гиперпараметры автоэнкодера, $\mathbf{W}^{(i)}$ – соответствующая матрица весов (параметров) автоэнкодера.

Сервер выполняет обучение в блокирующем режиме, то есть загруженные на шаге 4 обновления градиентов учитываются в порядке очередности поступления и до завершения текущей эпохи обучения обновления градиентов иных моделей не используются.

В соответствии с протоколом DSL_of_AE в данной работе проведено обучение авторской модели вариационного автоэнкодера AutoBlade [6, 7], который предназначен для прототипирования лопаток газотурбинных двигателей (ГТД). Выходной слой кодирующей части является NURB-слоем и включает n – нейронов (n-1 – есть степень базовых полиномов Бернштейна [6]). NURB-преобразует взвешенные и предобученные параметры опорных точек сплайнов и формирует дискретные точки новой кривой профиля лопатки ГТД. Число скрытых слоев в архитектуре AutoBlade устанавливалось равным log (n) и изменялось в ходе экспериментов автоматически в зависимости от n – степени полиномов Бершнейна. Использовались функции активации ReLU, оптимизация – пакетная, в качестве метрики качества моделей использована RMSE, ML-оптимизатор – Adams, используемый датасет – авторский синтетический [6] (автоматически сгенерированные 3D-формы лопаток ГТД с параметрическим представлением формы). Эксперименты проводились с использованием PyTorch3D, PyTorch Geometric и библиотек AutoSklearn. Результаты экспериментов представлены в таблице.

Средние метрики качества RMSE автоэнкодеров AutoBlade, обучаемых в соответствии с предложенным протоколом DSL_of_AE, близки к значениям метрик RMSE моделей,использовавших централизованный способ обучения, при котором по каналам связи передавались локальные обучающие данные и на стороне сервера формировался агрегированный датасет (что нарушает требование конфиденциальности). В частности, получено, что AutoBlade с числом латентных переменных n=16 при загрузке их всех (u=16) на сервер с размером пакета обучения M = 1 на валидационной выборке RMSE равна 0,486E-3 против 0,543E-3 для централизованного обучения. Для сравнения, средняя RMSE для моделей с локальным автономным обучением равна 0,556 E-2, что на порядок хуже для моделей, не связанных с сотрудничеством при обучении.

Следует отметить, что даже без дополнительных средств защиты предложенный протокол обеспечивает гораздо более высокую сте-

пень конфиденциальности при незначительных накладных коммуникационных расходах, чем любой иной подход при обучении. Вместо прямого раскрытия всех обучающих данных, единственная потенциальная утечка при использовании DSL_of_AE является косвенной, через небольшую часть параметров параметров-логгитов. Чтобы свести к минимуму даже эту утечку, можно применить дифференциальную конфиденциальность либо использовать конфиденциальные вычисления на базе криптографических примитивов [7, 8].

Библиографический список

1. *Wang Yuanchun*. A review of 3D reconstruction methods based on deep learning // Applied and Computational Engineering. 2024. DOI 35. 64-71. 10.54254/2755-2721/35/20230362

2. Verifynet: secure and verifiable federated learning / G. Xu [et al.] // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. (2019) 15, 911–926. URL: https://doi.org/10.1109/tifs.2019.2929409 (дата обращения: 14.11.2024).

3. Towards federated learning at scale: system design. 2019 / K. Bonawitz [et al.]. URL: https://arxiv.org/abs/1902.01046 (дата обращения: 14.11.2024).

4. *Wu W., Homsi S., Zhang Y.* (2024). Confidential and Verifiable Machine Learning Delegations on the Cloud. // Garcia-Alfaro J., Kozik R., Choraś M., Katsikas S. (eds) Computer Security ESORICS 2024. ESORICS 2024. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 14983. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-70890-9_10 (дата обращения: 14.11.2024).

5. (2020). Parallel Optimization Techniques for Machine Learning / S. Kylasa [et al.] // Grama A., Sameh A. (eds) Parallel Algorithms in Computational Science and Engineering. Modeling and Simulation in Science, Engineering and Technology. Birkhäuser, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-43736-7_13 (дата обращения: 14.11.2024).

6. *Жемелев Г. А.* Автоматический синтез трехмерных форм лопаток газовых турбин с помощью методов машинного обучения // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2024. № 2(59). С. 152–168.

7. *Беззатеев С. В., Жемелев Г. А., Фомичева С. Г.* Исследование производительности платформ AutoML при конфиденциальных вычислениях // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2024. № 3 (61). С. 109–126.

8. *Фомичева С. Г., Беззатеев С. В.* Механизмы защиты моделей машинного обучения от состязательных атак // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 10. С. 28–42.

УДК 004.056.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-95-101**

А. Ф. Хуцаева*,*
ассистент, аспирант
А. Г. Леевик*
аспирант
С. В. Беззатеев*
доктор технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***Национальный исследовательский университет ИТМО*

АНАЛИЗ ПОСТКВАНТОВЫХ ПРОТОКОЛОВ ЗАБЫВЧИВОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

В статье рассмотрены современные подходы к разработке протоколов забывчивой передачи данных. Работа включает сравнительный анализ постквантовых протоколов забывчивой передачи данных по объему передаваемых данных, количеству раундов и устойчивости к разным моделям атакующих, что позволяет определить их перспективность для практического применения.
Ключевые слова: *забывчивая передача данных, постквантовая криптография, конфиденциальные вычисления, криптографические протоколы.*

A. F. Khutsaeva*,*
Assistant, PhD Student
A. G. Leevik*
PhD Student
S. V. Bezzateev*
Dr. Sc., Tech., Assosiate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***ITMO University*

ANALYSIS OF POST-QUANTUM OBLIVIOUS TRANSFER PROTOCOLS

The article presents a comparative analysis of post-quantum oblivious transfer protocols, evaluating their data transmission capacity, communication round number, and resistance to various security models. This analysis allows for an assessment of their potential benefit for practical use.
Keywords: *oblivious transfer, post-quantum cryptography, secure multi-party computation, cryptographic protocols.*

Введение

Основная идея протокола забывчивой передачи данных (ЗПД, oblivious transfer) заключается в том, что одна сторона (отправитель) передает набор информации другой стороне (получателю) так, что отправитель не знает, какая именно часть данных была выбрана получателем, а получатель имеет возможность выбрать только определенную часть данных, а не весь набор. Забывчивая передача данных служит важной основой для построения более сложных криптографических протоколов конфиденциальных вычислений. В частности, протоколы ЗПД используются в рамках таких протоколов, как зашумленные цепи Яо [1], Голдрайх – Микали – Вигдерсон [2], пересечение множеств [3].

Впервые идею построения протокола ЗПД предложил М. Рабин [4]. Затем эта область получила развитие благодаря Ш. Эвен, О. Голдрайх, А. Лемпель, которые задали более формальное описание ЗПД, что помогло расширить варианты его применения [5]. Авторы предложили построение ЗПД в варианте 1-из-2, где получатель выбирает одно из двух возможных сообщений. Позднее были предложены обобщения: ЗПД 1-из-n, где получатель выбирает одно из n сообщений [6], и ЗПД k-из-n, где получатель выбирает k из n сообщений [7].

Кроме описанных решений, для ЗПД предлагаются различные оптимизации. Например, расширенный ЗПД (Extension OT), позволяющий сократить вычислительные и коммуникационные издержки [8]. Новые форматы, такие как коррелированный ЗПД (Correlated oblivious

transfer) и случайный ЗПД (Random oblivious transfer), делают возможным решение задач, где важны взаимосвязь или случайность передаваемых данных [9, 10].

Современные ЗПД строятся с помощью криптосистем с открытым ключом; как отмечается в работе [11], построение ЗПД с использованием только симметричной криптографии невозможно. Следовательно, с появлением мощного квантового компьютера ряд протоколов ЗПД [12–14], построенных на общеизвестных классических задачах, будет уязвим к атакам Шора [15]. Становится актуальным разработка и анализ ЗПД на задачах из области постквантовой криптографии.

В данной работе рассмотрены современные постквантовые протоколы забывчивой передачи данных. Проведен анализ существующих решений с точки зрения модели безопасности и объема передаваемых данных. В ходе анализа определены оптимальные решения с точки зрения производительности протоколов ЗПД.

Описание протокола забывчивой передачи данных

Протокол забывчивой передачи 1-из-2 – это двусторонний протокол между отправителем (S), у которого имеется набор сообщений $m_0, m_1 \in \{0,1\}^l$, и получателем (R), которому необходимо получить одно из двух сообщений. В таком случае S отправляет третьей доверенной стороне (ТДС) два сообщения $m_0, m_1 \in \{0,1\}^l$, а R отправляет ТДС индекс сообщения $b \in \{0,1\}$, которое хочет получить. Третья доверенная сторона, приняв информацию от R и S, согласно с полученным b отправляет R сообщение m_b.

Данный протокол должен удовлетворять следующим свойствам безопасности:

1. R не имеет никакой информации о сообщении m_{1-b}.

2. S не имеет никакой информации о выбранном отправителем бите b.

Рассмотрим случай, когда R и S взаимодействуют без ТДС. В таком случае они выполняют следующие шаги:

1. R задает пару открытый и секретный ключи (pk_b, sk_b) и значение $b \in \{0,1\}$ отправляет S пару открытых ключей (pk_b, pk_{1-b}), где pk_{1-b} – некоторое случайное сгенерированное значение.

2. S, получив открытые ключи, шифрует сообщения: $c_b = Enc(pk_b, m_b)$, $c_{1-b} = Enc(pk_{1-b}, m_{1-b})$ и отправляет зашифрованные сообщения c_0, c_1 стороне R.

3. R расшифровывает сообщение c_b с помощью секретного ключа sk_b.

Стоит отметить, что выбор pk_{1-b} в качестве случайного значения приведен для упрощенного описания протокола. Значение pk_{1-b} также должно зависеть от выбранного b и не должно расшифровывать сообщение c_{1-b}.

Протокол 1-из-2 можно расширить до версии 1-из-n, где S отправляет набор из n сообщений, а R может выбрать только 1 из них. Также существует вариант протокола k-из-n, где R уже может выбрать $k < n$ сообщений из возможных n.

В данном протоколе важна конфиденциальность двух сторон, для этого рассматриваются следующие модели злоумышленников. С точки зрения активности злоумышленника выделяют две модели:

1. Получестный (semi-honest): злоумышленник следует шагам протокола, но стремится узнать дополнительную информацию, анализирует полученную информацию в ходе протокола.

2. Активный (malicious): злоумышленник нарушает ход протокола, стремясь извлечь полезную для него секретную информацию.

С точки зрения стратегии «порчи» участников протокола (corruption), то есть участник из честного становится вредоносным (попадает под контроль злоумышленника и действует по его стратегии), выделяют следующие 2 типа стратегий:

1. Статическая модель. В данной модели множество вредоносных пользователей фиксировано перед началом выполнения алгоритма. Честные участники остаются честными, а вредоносные – вредоносными во время всей работы протокола.

2. Адаптивная модель. В данной модели злоумышленнику дана возможность портить участников во время работы алгоритма. Выбор участников и время их порчи зависит от злоумышленника. В данной модели, если участник испорчен, то он считается испорченным до конца выполнения протокола.

Выбор модели и стратегии злоумышленника влияет на теоретическую стойкость схемы, а также на ее производительность. Зачастую схемы, предлагаемые в рамках более слабых моделей злоумышленников, требуют меньше ресурсов и работают быстрее.

Кроме того, стоит помнить, что протокол ЗПД может использоваться как одна из составляющих другого протокола. Тогда при доказательстве безопасности протокола ЗПД необходимо учитывать условия встраивания в другой протокол. В связи с чем появляется такая модель, как

universal composability (UC) [16], которая позволяет рассматривать протокол ЗПД как «черный ящик» в рамках других протоколов.

Доказательство в модели UC использует парадигму real-ideal. В рамках парадигмы функциональность, которая обеспечивается протоколом, рассматривается в двух «мирах»: реальном и идеальном.

В рамках протоколов ЗПД «идеальным миром» является вариант ЗПД с третьей доверенной стороной, которая принимает n сообщений от отправителя (либо вырабатывает случайно равномерно самостоятельно) и k индексов получателя, после чего возвращает отправителю n сообщений, а получателю k сообщений под соответствующими индексами. В «реальном мире» получатель и отправитель коммуницируют напрямую друг с другом. Протокол считается безопасным в рамках такой модели в том случае, если наибольшее воздействие, которое может произвести атакующий на протокол в реальном мире, равно максимальному возможному влиянию на протокол в идеальном мире.

В рамках доказательства безопасности в данной модели строятся специальные алгоритмы симуляции, которые встраиваются в коммуникацию между атакующим и третьей доверенной стороной. Доказательство считается корректным, если доказано, что атакующий не может различить, коммуницирует ли он с симулятором или с реальным получателем.

Ввиду того, что доказывается неразличимость транскрипции процесса коммуникации атакующего и реального собеседника в рамках протокола и транскрипции процесса коммуникации атакующего с симулятором, можно сказать, что влияние атакующего на протокол в реальном мире не превышает его влияния на симулятор. Дополнительно это свойство позволяет рассматривать сам протокол как черный ящик, и не рассматривать его безопасность в рамках конструкций других протоколов.

Стоит отметить, что не для всех протоколов ЗПД доказана безопасность в рамках модели UC, как, например, классический протокол Белларе – Микали [7] на основе сложности задачи дискретного логарифма, который доказан в модели случайного оракула для получестного атакующего.

Современные подходы построения протоколов забывчивой передачи данных

Рассмотрим специальные случаи ЗПД, которые упрощают определенные сценарии и экономят вычислительные ресурсы, их можно разделить на две группы:

– Случайный ЗПД – в таком случае сообщения m_0 и m_1 генерируются стороной S случайным образом, а сторона R может получить только одно случайное сообщение согласно заранее выбранному индексу [17];

– Коррелированный ЗПД – в таком случае сообщения m_0 и m_1 должны удовлетворять некоторой корреляции Δ, например, $m_0 = r, m_1 = r \oplus \Delta$ [9].

Первая группа протоколов может применяться, когда в протоколах достаточно случайных данных, поэтому случайный ЗПД упрощает вычисления. В основном применяется как часть протоколов конфиденциальных вычислений.

Вторая группа позволяет оптимизировать протоколы, где можно заранее зафиксировать взаимосвязь сообщений. Коррелированный ЗПД активно применяется при решении задачи миллионеров [1, 18].

Как отмечалось ранее, чаще всего ЗПД используется как одна из составляющих частей более масштабного протокола. В связи с чем повышается количество запросов, выполняемых ЗПД. Это влечет за собой большую нагрузку, так как в основном протоколы строятся на криптосистемах с открытым ключом. Для снижения ресурсных затрат предложено расширение ЗПД (РЗПД) [19].

Данное расширение можно построить с помощью различных криптографических примитивов, например, с помощью симметричной криптографии, операции которой менее ресурсоемки, по сравнению с несимметричной. Так, РЗПД использует гибридное шифрование, где с помощью несимметричной криптографии шифруется симметричный ключ шифрования, который будет использоваться в дальнейших шагах протокола. Таким образом, вместо большого количества раз (миллионы или миллиарды) несимметричная криптография используется всего один раз, что значительно снижает вычислительные затраты [8, 20].

Расширение ЗПД также может строиться с помощью генераторов псевдослучайной корелляции (Pseudorandom Correlation Generator); они используются для генерации наборов данных, которые имеют заданные корреляции, но при этом выглядят случайными [21].

Важно отметить, что случайный и коррелированный ЗПД также могут быть реализованы с помощью РЗПД. Такой подход позволяет комбинировать эффективность и функциональность ЗПД.

Сравнительный анализ постквантовых протоколов забывчивой передачи данных

Помимо оптимизации ЗПД, на сегодняшний день актуально построение постквантовых ЗПД. Так, в работе [22] предлагается подход построения 1-из-2 протоколов ЗПД по принципу криптосистем с открытым ключом. Главным отличием является тот факт, что получатель посылает отправителю один открытый ключ и некоторое значение s, а отправитель на своей стороне самостоятельно вычисляет второй открытый ключ с помощью параметра s. Таким образом авторы предлагают снижать нагрузку на объем передаваемых данных и вычислений, производимых на стороне получателя. Согласно с данным решением построены протоколы ЗПД, основанные на задачах теории решеток и кодов, корректирующих ошибок, и доказана их безопасность в UC модели с помощью случайного оракула. Также представлен протокол ЗПД, основанный на допущении сложности решения задачи вычислительного Диффи – Хеллмана (Computational Diffie – Hellman assumption, CDH). При анализе его безопасности доказано, что CDH протокол не уступает по уровням защиты одному из самых эффективных ЗПД [13].

В [23] для уменьшения объема передаваемой информации и количества раундов предложено построение протокола в новой более слабой модели, которая названа авторами как «эндемическая» (endemic). Эндемическая модель допускает тот факт, что атакующий может адаптировать выбор сообщений исходя из полученных данных, однако, авторы не считают такое влияние столь существенным, поэтому рассматривают его как допустимое. В рамках данной модели авторам удалось построить протокол ЗПД на основе сложности распознавательной задачей Диффи – Хеллмана (Decisional Diffie – Hellman assumption, DDH), который требует всего один раунд коммуникации, но для данного протокола доказательство безопасности имеет ряд ограничений в UC модели. Также в данной статье на основе новой модели безопасности предложено построение протокола ЗПД на основе схем инкапсуляции ключа, для такого варианта протокола была доказана безопасность в UC модели. На основе данного протокола в работе также представлен вариант с использованием постквантовой схемы инкапсуляции ключа CRYSTALS-Kyber [24].

В [25] представлен протокол ЗПД, построенный на изогениях эллиптических кривых. Авторы предлагают два варианта протокола: один из них безопасен относительно получестного атакующего, а другой – активного атакующего. Безопасность двух версий доказана в модели UC. Стойкость основывается на задаче обоюдного Commutative Supersingular Isogeny Diffie Hellman (CSIDH), предложенной авторами. В работе доказывается эквивалентность данной задачи задаче вычислительного CSIDH, которая считается сложной. Использование математического аппарата изогений позволяет добиться малого объема передаваемых данных, однако, само вычисление изогений является трудоемким процессом. Таким образом в работе сделан акцент на уменьшении количества вычисляемых изогений, по сравнению с предыдущими, что позволяет ускорить вычисления.

Ввиду того, что схемы шифрования и подписи на решетках достаточно популярны и в целом обладают высокой скоростью работы алгоритмов, то на данном математическом примитиве построено достаточно много вариантов протоколов ЗПД. В работе [26] предлагается вариант протокола ЗПД, построенный на сложности задачи Learning with errors (LWE). Безопасность протокола рассматривается в рамках модели адаптивного злоумышленника, то есть рассматривается более сильный злоумышленник. Преимуществом такого подхода является то, что теоретическая безопасность протокола повышается, однако, недостатком является повышение затрат на коммуникацию, что можно видеть в таблице.

В [27] представлен еще один подход к построению протоколов ЗПД, который использует схемы симметричного шифрования и схемы обмена ключей за один раунд коммуникации, то есть такие схемы, где значения, передаваемые по сети, вычисляются предварительно и не зависят друг от друга. Для обеспечения безопасности протокола ЗПД авторам приходится увеличивать количество раундов коммуникации, но несмотря на этот факт общее количество передаваемых данных уменьшается. Это происходит из-за того, что в протоколе используется симметричное шифрование, а несимметричное используется для однократного обмена ключами. Стойкость протокола доказана в модели UC для активного атакующего. В статье также представлена реализация подхода на теории решеток, в частности безопасность основывается на сложности задачи Ring-LWE (RLWE).

Еще одним вариантом протокола ЗПД на решетках является схема [28]. В ней авторы построили протокол на основе подхода Наора – Пинкаса [12] и схемы обмена ключей Saber [29]. Стойкость протокола основывается на задаче

Таблица

Параметры постквантовых протоколов забывчивой передачи данных

Протокол	Задача	Модель атакующего	Стратегия атакующего	Объем передаваемых данных, Кб	Количество раундов
Mansy-Rindal [23]	MLWE	Эндемический	Адаптивная	4.5	2
Dong и др. [28]	MLWR	Активный отправитель; получестный получатель	Статическая	2.2	2
Lai и др. [25]	Обоюдный CSIDH	Получестный	Статическая	0.22	2
		Активный	Статическая	0.53	4
CROOT [30]	Синдромное декодирование	Активный	Адаптивная	33	2
Blazy и др. [26]	LWE	Активный	Адаптивная	313 825	2
Branco и др. [27]	RLWE	Активный	Статическая	3	4
Kundu и др. [31]	MQ	Получестный	Статическая	764.2	3
Barreto и др. [22]	Синдромное декодирование	Активный	Адаптивная	19.4	2

Module Learning With Rounding (MLWR), но безопасность в UC модели доказана только для активного отправителя и получестного получателя. Тем не менее с точки зрения производительности и объемов передаваемых данных новая схема выигрывает у [23], построенной на Module-LWE (MLWE), и может конкурировать со схемой [25] при учете времени работы алгоритмов.

Кроме теории решеток, существуют реализации протоколов ЗПД на других математических задачах. Одной из них является задача синдромного декодирования. Как было сказано ранее, в работе [22] предложен протокол ЗПД на основе квазициклических кодов, однако, существуют другие реализации, как, например, работа [30]. В данной работе предлагается протокол, строящийся на кодах ранговой метрики, в частности, в основе протокола лежит схема шифрования HQC. Безопасность протокола доказывается в модели UC для активного адаптивного атакующего.

Еще одним математическим примитивом, на котором строятся постквантовые криптографические схемы, являются многомерные уравнения. Сложность данных схем строится на задаче Multivariate Quadratic (MQ) – решении системы однородных квадратичных уравнений от нескольких переменных. В частности, схема [31] строится на данном примитиве. В работе представлены версии протоколов как в модели получестного атакующего, так и в модели активного атакующего. В таблице представлена оценка для варианта относительно получестного атакующего, так как для активного объем передаваемых данных и количество раундов увеличиваются. Стоит также отметить, что многомерные уравнения в качестве шифрования показали себя не лучшим образом, так как для ряда схем были найдены атаки. Таким образом вопрос о безопасности данной схемы с учетом новых атак требует дополнительного изучения.

В таблице представлены параметры вышеописанных протоколов. Протоколы ЗПД оценивались по задачам, на которых они построены; модели злоумышленника и его стратегии; объему передаваемых данных за весь протокол; количество раундов за весь протокол, под одним раундом понимается передача данных от отправителя получателю и передача от получателя отправителю. Для оценки выбраны ЗПД с уровнем безопасности 192 бита, длиной передаваемых сообщений 256 бит, безопасность которых доказана в UC модели. Некоторые из анализируемых протоколов предложены в варианте 1-из-n, но в данной работе они упрощены до 1-из-2.

По результатам таблицы можно заключить, что наиболее эффективным вариантом с точки зрения объема передаваемых данных (0.22/0.53 Кб) является протокол, построенный на криптографии на изогениях. Однако стоит учитывать, что данное решение применимо в системах, где есть ограничения по памяти, но нет ограничений на вычислительные мощности. Это обусловлено особенностями математического аппарата изогений эллиптических кривых, тем не менее в данном направлении ведутся активные работы по улучшению их характеристик [32].

Второе место по объемам занимает криптография на решетках, а именно схемы [23, 27, 28] на вариантах задач LWE. Можно заметить, что схема [26] сильно уступает из-за того, что она строится на классическом варианте задачи LWE, для которой не используются мето-

ды сжатия открытых ключей и шифротекстов. Тем не менее [26] обладает сильным сочетанием модели и стратегии атакующего. В целом современная криптография на решетках на данный момент является одной из самых перспективных в постквантовом направлении. Схемы, построенные на задачах теории решеток, предлагают наиболее оптимальный вариант, балансируя между объемами данных и скоростью их вычисления.

Протоколы ЗПД на кодовых конструкциях [22, 30] обладают недостатком в виде большого размера передаваемых данных. Данный факт в целом свойственен схемам шифрования, основанных на помехоустойчивых кодах. Однако представленные схемы обладают хорошими обоснованиями безопасности, а именно рассматривают модель активного адаптивного атакующего.

Отдельно стоит отметить работу [31], построенную на математическом аппарате многомерных уравнений. Ввиду уже упомянутых ранее вопросов к ее безопасности вкупе с большим объемом передаваемых данных, данная схема менее всего рекомендуется к использованию.

Заключение

Протоколы забывчивой передачи данных представляют собой важный инструмент в современной криптографии, в частности они являются важными составляющими различных протоколов конфиденциальных вычислений.

Анализ существующих постквантовых вариантов ЗПД показал, что протоколы, построенные на изогениях эллиптических кривых, продемонстрировали минимальный объем передаваемых данных, что делает их предпочтительными для систем с ограниченными ресурсами памяти. Однако их вычислительная сложность остается высокой. Протоколы на основе решеток обеспечивают баланс между вычислительной эффективностью и объемами передаваемых данных, что делает их перспективными для широкого применения.

Исследование подтверждает, что развитие протоколов ЗПД идет в направлении повышения их эффективности, безопасности и адаптируемости к новым угрозам. Несмотря на достигнутые успехи, остаются открытые вопросы, связанные с уменьшением размеров передаваемых данных и количества раундов при сохранении требуемого уровня безопасности. Это делает область изучения протоколов ЗПД перспективной для дальнейших исследований.

Библиографический список

1. *Yao A. C.*-C. How to generate and exchange secrets // 27th annual symposium on foundations of computer science (Sfcs 1986). IEEE, 1986. С. 162–167.

2. *Goldreich O., Micali S., Wigderson A.* How to play any mental game, or a completeness theorem for protocols with honest majority // Providing Sound Foundations for Cryptography: On the Work of Shafi Goldwasser and Silvio Micali. 2019. С. 307–328.

3. *Rindal P., Rosulek M.* Malicious-secure private set intersection via dual execution // Proceedings of the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. 2017. С. 1229–1242.

4. *Rabin M. O.* How to exchange secrets with oblivious transfer // Cryptology ePrint Archive. 2005. URL: https://eprint.iacr.org/2005/187.pdf (дата обращения: 20.11.2024).

5. *Even S., Goldreich O., Lempel A.* A randomized protocol for signing contracts // Communications of the ACM. 1985. Т. 28. №. 6. С. 637–647.

6. *Brassard G., Crepeau C., Robert J.*-M. All-or-nothing disclosure of secrets // Conference on the Theory and Application of Cryptographic Techniques: Springer, 1986. С. 234–238.

7. *Bellare M., Micali S.* Non-interactive oblivious transfer and applications // Conference on the Theory and Application of Cryptology. New York: Springer New York, 1989. С. 547–557.

8. Extending oblivious transfers efficiently / Y. Ishai [et al.] // Annual International Cryptology Conference. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. С. 145–161.

9. Efficient and secure multiparty computation from fixed-key block ciphers / C. Guo [et al.] //2020 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). IEEE, 2020. С. 825–841.

10. Roted: Random oblivious transfer for embedded devices / P. Branco [et al.] // IACR Transactions on Cryptographic Hardware and Embedded Systems. 2021. С. 215–238.

11. *Santos M. B., Mateus P., Pinto A. N.* Quantum oblivious transfer: a short review //Entropy. 2022. Т. 24. №. 7. С. 945.

12. *Naor M., Pinkas B.* Efficient oblivious transfer protocols // SODA. 2001. Т. 1. С. 448–457.

13. *Chou T., Orlandi C.* The simplest protocol for oblivious transfer // Progress in Cryptology--LATINCRYPT 2015: 4th International Conference on Cryptology and Information Security in Latin America, Guadalajara, Mexico, August 23-26, 2015, Proceedings 4. Springer International Publishing, 2015. С. 40– 58.

14. *Hauck E., Loss J.* Efficient and universally composable protocols for oblivious transfer from the CDH assumption // Cryptology ePrint Archive. 2017.

URL: https://eprint.iacr.org/2017/1011 (дата обращения: 20.11.2024).

15. *Shor P. W.* Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring // Proceedings 35th annual symposium on foundations of computer science. Ieee, 1994. С. 124–134.

16. *Canetti R.* Universally composable security: A new paradigm for cryptographic protocols // Proceedings 42nd IEEE Symposium on Foundations of Computer Science. IEEE, 2001. С. 136–145.

17. Randomized oblivious transfer for secure multiparty computation in the quantum setting / Costa B. [et al.] // Entropy. 2021. Т. 23. №. 8. С. 1001.

18. *Couteau G.* New protocols for secure equality test and comparison // International Conference on Applied Cryptography and Network Security. Cham: Springer International Publishing, 2018. С. 303–320.

19. *Beaver D.* Correlated pseudorandomness and the complexity of private computations // Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing. 1996. С. 479–488.

20. More efficient oblivious transfer and extensions for faster secure computation / G. Asharov [et al.] // Proceedings of the 2013 ACM SIGSAC conference on Computer & communications security. 2013. С. 535–548.

21. Oblivious transfer with constant computational overhead / E. Boyle [et al.] // Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. С. 271–302.

22. A framework for efficient adaptively secure composable oblivious transfer in the ROM / P. S. L. M. Barreto [et al.] // arXiv preprint arXiv:1710.08256. 2017. URL: https://eprint.iacr.org/2017/993 (дата обращения: 29.11.2024).

23. *Mansy D., Rindal P.* Endemic oblivious transfer // Proceedings of the 2019 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. 2019. С. 309–326.

24. CRYSTALS-Kyber: a CCA-secure module-lattice-based KEM / J. Bos [et al.] // 2018 IEEE European Symposium on Security and Privacy (EuroS&P). IEEE, 2018. CRYSTALS-Kyber. С. 353–367.

25. *Lai Y. F., Galbraith S. D., Delpech de Saint Guilhem C.* Compact, efficient and UC-secure isogeny-based oblivious transfer // Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques. Cham: Springer International Publishing, 2021. С. 213–241.

26. *Blazy O., Chevalier C., Vu Q. H.* Post-quantum UC-secure oblivious transfer in the standard model with adaptive corruptions // Proceedings of the 14th International Conference on Availability, Reliability and Security. 2019. С. 1–6.

27. A framework for universally composable oblivious transfer from one-round key-exchange / P. Branco [et al.] // Cryptography and Coding: 17th IMA International Conference, IMACC 2019, Oxford, UK, December 16–18, 2019, Proceedings 17. Springer International Publishing, 2019. С. 78–101.

28. A Simple Post-Quantum Oblivious Transfer Protocol from Mod-LWR / S. Dong [et al.] // Cryptology ePrint Archive. 2024. URL: https://eprint.iacr.org/2024/1116 (дата обращения: 29.11.2024).

29. Saber: Module-LWR based key exchange, CPA-secure encryption and CCA-secure KEM / J. P. D'Anvers [et al.] // Progress in Cryptology–AFRICACRYPT 2018: 10th International Conference on Cryptology in Africa, Marrakesh, Morocco, May 7–9, 2018, Proceedings 10. Springer International Publishing, 2018. С. 282–305.

30. CROOT: Code-based Round-Optimal Oblivious Transfer / N. Aragon [et al.] // ICETE (2). 2020. С. 76–85.

31. *Kundu N., Debnath S. K., Mishra D.* 1-out-of-2: post-quantum oblivious transfer protocols based on multivariate public key cryptography // Sādhanā. 2020. Т. 45. №. 1. С. 209.

32. CTIDH: faster constant-time CSIDH / G. Banegas [et al.] // IACR Transactions on Cryptographic Hardware and Embedded Systems. 2021. Т. 2021. №. 4. С. 351–387.

МЕХАТРОНИКА И ВИБРАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.865.8 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-102-108**

В. Ю. Головин*
магистрант
В. А. Давыдов*
магистрант
В. В. Булатов*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОБЗОР ПРОГРАММНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СИМУЛЯЦИИ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ ПОВЕДЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Произведен поиск программных решений для симуляции мобильных робототехнических комплексов. Определены наиболее актуальные существующие разработки. Выполнен анализ полученной информации по теме, результаты представлены в виде сравнительной таблицы с ключевыми отличиями и определены наиболее подходящие сценарии применения данных программных комплексов с учетом их особенностей.
Ключевые слова: *среда симуляции, робототехнический комплекс, Webots, Gazebo, Nvidia Isaac Sim, Unity Robotic Hub.*

V. Y. Golovin*
Postgraduate Student
V. A. Davydov*
Postgraduate Student
V. V. Bulatov*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

REVIEW OF SOFTWARE SOLUTIONS FOR STIMULATION OF MOBILE ROBOTIC COMPLEXES

The search for software solutions for the stimulation of mobile robotic complexes has been carried out, the most relevant existing developments have been identified. The analysis of the received information on the topic is performed, the results are presented in the form of a comparative table with key differences and the most suitable scenarios for the use of these software complexes are determined, taking into account their features.
Keywords: *simulation environment, robotics complex, Webots, Gazebo, Nvidia Isaac Sim, Unity Robotic Hub.*

С ростом вычислительных мощностей и их доступности физическое моделирование постепенно уступило место компьютерному моделированию объектов. С развитием технологий появилась возможность симуляции сложных систем в различных областях. Современные инструменты позволяют с высокой точностью воспроизводить поведение объектов в реальных условиях, что открывает новые горизонты для исследований и разработки.

Первые упоминания симуляции работы робототехнических систем (РТС) появились в 1950-х гг. Это были модели, в которых симулировались автоматические системы для управления роботами.

Первые компьютерные симуляторы в сфере мобильной робототехнике были основаны на развившихся CAD-системах. Появление специализированных программ было вызвано необходимостью симуляции динамических процессов взаимодействия объектов со средой, обладающей определенными свойствами.

Дальнейшее качественное развитие симуляторов связано с прогрессом в технологиях искусственного интеллекта (ИИ), развитием вычислительных технологий, появлением продви-

нутых систем расчета физических взаимодействий.

Такие программные системы решают ряд ключевых задач, с которыми сталкиваются инженеры и программисты, работающие над разработкой мобильных робототехнических комплексов. Внедрение данной технологии предполагает следующие преимущества:

1. Отработка большего числа сценариев и паттернов поведения, что способствует улучшению адаптивности и функциональности робота.

2. Обучение нейросетевых алгоритмов робота при минимальном объеме данных или даже без них, что ускоряет процесс разработки.

3. Параллельная разработка аппаратной и программной частей, что сокращает время до получения рабочего прототипа.

4. Повышенная безопасность и отсутствие рисков, связанных с тестированием в реальных условиях.

5. Снижение временных затрат на тестирование благодаря возможности виртуального моделирования без необходимости постоянного ремонта оборудования или создания новых прототипов.

6. Интеграция новых компонентов и датчиков по мере их разработки, что позволяет гибко адаптировать систему в процессе работы.

Полученная среда позволит также сократить время разработки последующих робототехнических систем, тем самым сократив стоимость и время разработки. Все перечисленные факторы повышают конкурентоспособность продукта.

За последние годы было разработано ряд программ, позволяющих производить симуляцию [1].

Так, основными критериями были: возможность симуляции динамических процессов, а также наличие системы расчета механических взаимодействий между объектами; наличие реализованных проектов с данным программным обеспечением (ПО) в сфере мобильной робототехники; наличие документации от разработчика; наличие обширной библиотеки готовых компонентов и различных датчиков; развитая графическая составляющая симуляции.

Существует два подхода к созданию симулятора для робототехнической среды. Первый – это разработка специализированного ядра, которое включает в себя все необходимые функции для симуляции робототехнических систем. Альтернативным решением является модульная структура, где главным элементом является операционная система для моделирования поведения робота, а промежуточный блок для обмена данными между ними разрабатываются отдельно. Такой подход обеспечивает гибкость и масштабируемость системы, позволяя улучшать каждый компонент независимо.

Наибольшее распространение первого подхода (с применением неделимых специализированным главных блоков) приобрели Gazebo, NVIDIA Isaac Sim и Webots.

Рассмотрим первую программную среду Gazebo, которая является симулятором робототехники с открытым исходным кодом. Благодаря Gazebo пользователи получают доступ к высокоточным методам симуляции физических взаимодействий, рендерингу и широкому ряду моделей датчиков. Кроме того, у пользователей и разработчиков есть множество возможностей для моделирования, включая графический интерфейс пользователя, плагины, асинхронную передачу сообщений [2].

Ключевые особенности Gazebo:

– возможность использования нескольких алгоритмов расчета механических взаимодействий, включая ODE, Bullet, DART и Simbody, для реализации скольжения, столкновения, инерции, трения, гравитации и других физических взаимодействий объектов в 3D-пространстве;

– широкий спектр поддерживаемых типов робототехнических комплексов;

– наличие визуализации, с возможностью создавать сложные среды для симуляции, включая настройку текстур и освещения;

– тесная интеграция с Robot Operation System (ROS), что позволяет использовать эту платформу для разработки и тестирования алгоритмов управления роботами, обменом данными между различными компонентами системы и быстрого прототипирования;

– открытая платформа с доступом к исходному коду, что позволяет разработчикам модифицировать и адаптировать систему под специфические задачи и требования.

На базе данного решения были реализованы: PX4, являющийся программным обеспечением для управления полетом дронов и других беспилотных транспортных средств [3]; реализовано множество алгоритмов SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) [4]; проводились соревнования по робототехнике DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) Robotics Challenge с решением сложных задач: спасение людей и манипуляции в опасных или разрушенных участках, реализация проектов цифровых двойников [5] и систем автономной навигации [6]. Пример визуализации среды симулирования представлен на рис. 1.

Рис. 1. Пример визуализации в симуляторе Gazebo

Рассмотрим платформу для моделирования NVIDIA Isaac Sim, призванную помочь разработчикам проектировать, моделировать, тестировать и обучать роботов и автономные машины на базе искусственного интеллекта в физически-ориентированной виртуальной среде [7].

Данная среда симуляции в основном применяется совместно с переработанными компанией Nvidia пакетами ROS, широко используемого на рынке программного продукта.

NVIDIA Isaac ROS – это набор пакетов для ускоренных вычислений и моделей искусственного интеллекта, предназначенных для упрощения и ускорения разработки передовых приложений для робототехники с искусственным интеллектом.

Ключевые особенности NVIDIA Isaac Sim:

– оптимизация под аппаратное обеспечение NVIDIA для ускорения вычислений в области ИИ, компьютерного зрения и обработки данных сенсоров (технологии TensorRT и CUDA);

– поддержка разнообразных типов сенсоров, таких как камеры, LiDAR, радары и другие устройства, используемые в робототехнике для восприятия окружающей среды;

– широкие возможности по работе с ИИ, включающие в себя готовые примеры и библиотеки для разработки и обучения моделей машинного обучения, включая нейросети для различных задач робототехники (например, для распознавания объектов, планирования траектории и др.);

– поддержка функционала и наличие переработанных пакетов ROS;

– возможность параллельного тестирования нескольких роботов в симуляции;

– высокое качество графической симуляции позволяет собрать достаточный набор данных при отсутствии возможности сбора реальных данных;

– гибкая настройка среды для генерации данных, а именно изменение расположения объектов, освещения, наложения объектов на другие объекты [8].

В основном Nvidia Isaac Sim находит применение в проектах: связанных с машинным обучением и нейронными сетями; при разработке цифровых двойников [9]; при разработке алгоритмов навигации [10, 11]. Пример визуализации среды симулирования NVIDIA Isaac Sim представлен на рис. 2.

Последним рассматриваемым представителем первой группы (решений на базе цельных специализированных программных ядер) является Webots. Это многоплатформенное настольное приложение с открытым исходным кодом, которое используется для моделирования поведения роботов [12].

Ключевые особенности Webots:

– возможность точной симуляции, ввиду поддержки различных алгоритмов обработки физического взаимодействия объектов, таких как ODE и Bullet;

– поддержка различных роботов и платформ от мобильных платформ до манипуляторов, а

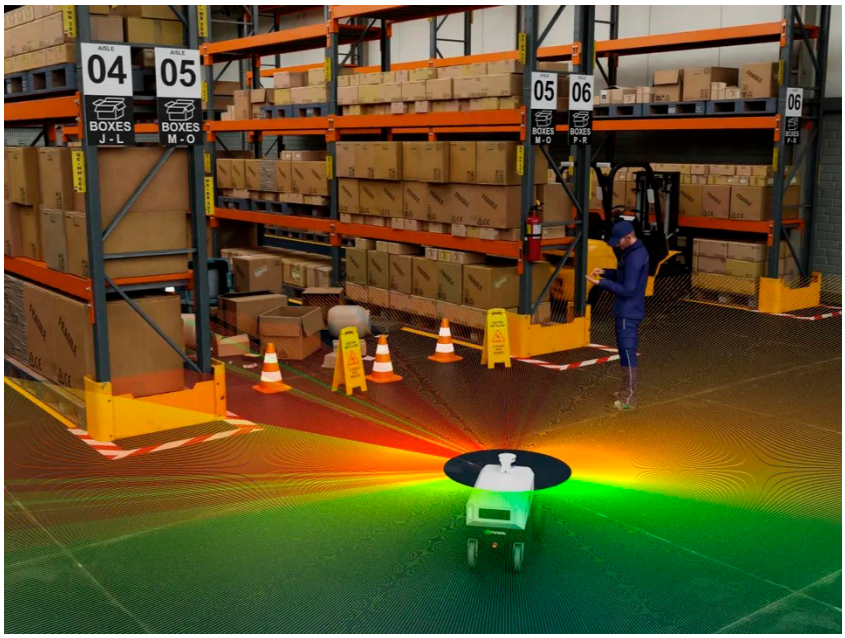


Рис. 2. Пример визуализации в симуляторе Nvidia Isaac Sim

также возможность интеграции с различными сенсорами;

– открытый исходный код, что позволяет разработчикам изменять и адаптировать платформу под свои задачи;

– многофункциональные инструменты для разработки для создания и редактирования 3D-мира, а также поддержку различных видов сенсоров (камеры, лазерные дальномеры, гироскопы и т. д.);

– высокая производительность благодаря оптимизации для работы на различных платформах, включая поддержку многозадачности, что повышает эффективность симуляции в реальном времени.

Применение Webots: симуляция работы захватов робота [13]; разработка алгоритмов поведения робота на базе системы глубокого обучения с подкреплением [14]; разработка алгоритмов навигации автономных роботов [15].

Во второй группе представлены связки ROS и различных игровых движков, имеющих развитую симуляцию физики, обладающие высокой производительностью и рядом готовых компонентов, позволяющих гибко и с наименьшими временными затратами настраивать среду симуляции. Рассмотрим лишь решение на Unity ввиду его наиболее активного применения среди других продуктов данной группы.

Перейдем к представителю группы – кроссплатформенной среде разработки компьютерных игр [16]. Ведущий в отрасли движок Unity предоставляет инструменты для создания и использования игр и других интерактивных приложений в режиме реального времени, а также для их работы на самых разных устройствах.

Версия Unity 6 включает в себя более быстрый рендеринг, разнообразные опции настроек освещения, сквозные многопользовательские рабочие процессы, расширенные возможности искусственного интеллекта и более глубокую поддержку мобильных веб-приложений.

С применением библиотек, поддерживающих работу с ROS, данное ядро позволяет производить симуляцию робототехнических комплексов, под управлением Robot Operation System.

Unity-Robotics-Hub – это репозиторий на GitHub, предоставляющий учебные материалы, документацию и рабочие примеры для моделирования и разработки робототехнических систем в Unity. Целью проекта является сокращение разрыва между возможностями Unity для создания игр и применением этой платформы в робототехнике, предлагая инструменты для моделирования, тестирования и выпуска роботизированных решений:

– интеграция ROS и Unity с сохранением полного функционала ROS;

– производительные и реалистичные физическая и графическая симуляции;

– Unity предоставляет мощные графические возможности для создания реалистичных 3D-окружений, что дает возможность моделировать различные сценарии, от простых лабораторных установок до сложных городских ланд-

Рис. 3. Пример визуализации в симуляторе Unity-ROS

шафтов или природных территорий. Это позволяет использовать полученные данные для решения задач машинного обучения и ИИ;

– большие возможности по симуляции автономной навигации. Так, в Unity можно моделировать различные ландшафты, дорожные условия и препятствия, чтобы проверить, как робот будет взаимодействовать с окружающей средой при выполнении задачи навигации по сложной местности;

– многозадачность и распределенные системы исходя из изначального назначения продукта позволяют использовать нескольких роботов, работающих в одной виртуальной среде, где ROS предоставляет средства для управления распределенными системами, тем самым несколько роботов могут взаимодействовать друг с другом и обмениваться данными через ROS-сообщения;

– Unity может быть использован для визуализации поведения роботов в реальном времени;

– широчайшие спектр поддерживаемых типов роботов (мобильные роботы, манипуляторы, дроны и автономные автомобили);

– большое количество готовых моделей и библиотек для быстрого прототипирования.

Применение Unity-ROS: разработка алгоритмов навигации для мобильной робототехники, включая мультиагентные системы [17–19]; разработка алгоритмов для коллаборативных роботов [20]; создание синтетических данных и обучение моделей нейронных сетей, с последующей разработкой алгоритмов навигации [21]; разработка алгоритмов автономного вождения. Пример визуализации среды симулирования представлен на рис. 3.

По итогам рассмотренного материала представим таблицу с главными особенностями программных сред.

Рассмотрим наиболее оптимальные сценарии применения данных решений.

Gazebo лучше всего подходит для симуляции робототехнических комплексов со сложным поведением, использующих фреймворк ROS. Это особенно полезно для исследовательских и промышленных приложений, где важно работать с большими и сложными системами. Наличие нескольких физических движков позволяет точно моделировать поведение роботов в реальных условиях.

Nvidia Isaac Sim в свою очередь позволяет использовать возможности GPU для симуляции и ускоренного обучения с использованием глубокого обучения, что отлично подходит для задач, где важна большая вычислительная мощность, например, для обучения нейросетей с использованием реальных сценариев. Помимо этого, симулятор ориентирован на автономных роботов с акцентом на обработку изображений, восприятие окружающей среды и взаимодействие с реальным миром, а также позволяет эффективно использовать параллельные вычисления для ускорения симуляций и обучения моделей.

Продукт Webots целесообразно использовать, если требуется образовательная среда для разработки и тестирования роботов средней сложности с простыми сценариями. Благодаря

Таблица

Сравнение программных решений по ключевым параметрам

Характеристика	Gazebo	NVIDIA Isaac Sim	Webots	Unity Robotics Hub
Тип симуляции	Симуляция физики с моделями роботов	Симуляция физики на базе алгоритмов NVIDIA PhysX	Симуляция физики с моделями роботов	Симуляция в игровом движке Unity
Поддержка графики	3D-визуализация	Высококачественная графика (Rays tracing)	3D-визуализация	Высококачественная 3D графика, возможно использование Ray Tracing
Гибкость в настройках	Высокая, поддержка плагинов и настроек	Высокая, но зависит от экосистемы NVIDIA	Высокая, доступность модификации роботов	Средняя, зависит от доступных инструментов Unity
Сложность использования	Средняя, требует знания ROS и работы с плагинами	Средняя, зависит от использования экосистемы NVIDIA	Средняя, интуитивно понятный интерфейс	Низкая, интуитивно понятный интерфейс Unity
Лицензия	Открытая (Apache 2.0)	Проприетарная (частично открытая)	Открытая (LGPL)	Бесплатно для некоммерческих целей, коммерческая лицензия

удобному интерфейсу и наличию готовых моделей роботов позволяет легко создавать и тестировать роботов без необходимости глубоких технических знаний. Этому благотворит низкий порог вхождения, а широкий выбор поддерживаемых роботов и сенсоров позволяет быстро разрабатывать и отлаживать различные модели роботов, что делает его полезным в лабораторных или исследовательских проектах, требующих визуализировать поведение роботов.

Игровой движок Unity известен своей мощной графикой и визуализацией, что делает его идеальным выбором для симуляции с акцентом на визуальные эффекты и интерактивность. Низкая задержка и высокая производительность (для данного качества графики) делает его подходящим для симуляции в реальном времени с высокими требованиями к визуализации, а интеграция с машинным обучением и ИИ позволяет производить обучение агентов и тестировать сценарии в различных условиях, графически приближенных к реальным.

Заключение

По результатам обзора были определены актуальные программные решения для симуляции мобильных робототехнических комплексов: Gazebo, Unity Robotic Hub, Webots или Nvidia Isaac. Также, были определены условия, при которых следует использовать каждое из рассмотренных решений.

Кроме того, представлена сравнительная таблица, позволяющая более детально ознакомиться с ключевыми особенностями и отличительными характеристиками каждого из этих решений.

В итоге, исходя из проведенного анализа, можно сказать, что для систем мобильных робототехнических комплексов со сложным поведением следует использовать Unity ROS или Gazebo.

Библиографический список

1. Digital Mock-Ups for Nuclear Decommissioning: A Survey on Existing Simulation Tools for Industry Applications / A. Cryer [et al.] // Robotics & Automation Engineering Journal. 2023. № 5.

2. Gazebo Sim: A Robotic Simulator. URL: https://github.com/gazebosim/gz-sim (дата обращения: 10.12.2024).

3. What Is PX4? URL: https://px4.io/software/software-overview/ (дата обращения: 10.12.2024).

4. *Aydemir H., Tekerek M., Gök M.* Examining of the Effect of Geometric Objects on SLAM Performance Using ROS and Gazebo // El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi. 2021. № 8.

5. Extended Reality Application Framework for a Digital-Twin-Based Smart Crane / Ch. Yang [et al.] // Applied Sciences. 2022. Т. 12. № 6030.

6. *Hussein A., Garcia F., Olaverri Monreal C.* ROS and Unity Based Framework for Intelligent Vehicles Control and Simulation// 2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), 1-6.

7. NVIDIA Isaac Sim. URL: https://developer.nvidia.com/isaac/sim (дата обращения: 10.12.2024).

8. *Belyaev P., Spivak A., Neverov E.* Development of the Detecting System of the Landmark Tags to Increase the Navigation Accuracy of an Unmanned Vehicle in a Known Location // Proceedings of the XXth Conference of Open Innovations Association FRUCT. 2021. С. 36–41.

9. A ROS 2 and TwinCAT Based Digital Twin Framework for Mechatronics Systems / A. Sterk-Hansen [et al.] // 11th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA), 2023, 485–490.

10. NavRL: Learning Safe Flight in Dynamic Environments / Z. Xu [et al.] // IEEE Robotics and Automation Letters, 659–666.

11. Using Deep Reinforcement Learning with Automatic Curriculum Learning for Mapless Navigation in Intralogistics / H. Xue [et al.] // Applied Sciences. 2022. Т. 12. № 3153.

12. Simulating your robots with Webots. URL: https://cyberbotics.com/ (дата обращения: 10.12.2024).

13. Developing Simulation Models for Soft Robotic Grippers in Webots / Y. Hadi [et al.]. 2024.

14. Deepbots: A Webots-Based Deep Reinforcement Learning Framework for Robotics / M. Kirtas [et al.] // Proceedings of the 8th International Conference on Computational Intelligence in Robotics and Automation. 2020. P. 75–88.

15. Modelling and Simulation of Autonomous Indoor Robotic Wastebin in Webots for Waste Management in Smart Buildings / M. Mohan [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Т. 1012. № 012022.

16. Unity Robotics Hub. URL: https://github.com/Unity-Technologies/Unity-Robotics-Hub (дата обращения: 10.12.2024).

17. A Swarm Robotics Navigation Simulator for Phenotyping Soybean Plants using Voronoi-Ant Colony Optimization / S. R. Gummi [et al.] // Proceedings of the 16th International Conference on Precision Agriculture 21–24 July, 2024.

18. MAES: a ROS 2-compatible simulation tool for exploration and coverage algorithms / M. Andreasen [et al.] // Artificial Life and Robotics. 2023. Т. 28.

19. SERN: Simulation-Enhanced Realistic Navigation for Multi-Agent Robotic Systems in Contested Environments / J. Hossain [et al.]. 2024.

20. *Coronado E., Ueshiba T., Ramirez-Alpizar I. G.* A Path to Industry 5.0 Digital Twins for Human–Robot Collaboration by Bridging NEP+ and ROS // Robotics. 2024. Т. 13. № 28.

21. Extension of a Unity Simulation Environment with a LiDAR Sensor / L. Brügel [et al.] // Reports on Energy Efficient Mobility, 130–139.

УДК 007.52 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-109-113**

К. С. Гончаров*
аспирант
А. М. Литвиненко*
доктор технических наук, профессор
**Воронежский государственный технический университет*

СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО МОДУЛЯ РУЛЕВОГО ПРИВОДА ИНФОРМАЦИОННОГО РОБОТА

Рассмотрены подходы к синтезу электротехнического комплекса информационного робота с учетом взаимодействия его основных подсистем: электроприводов, систем управления и энергообеспечения. Проанализированы момент-кинематические и момент-энергетические характеристики электродвигателей, их влияние на динамику привода и приемистость системы.
Ключевые слова: *электропривод, момент-энергетическая характеристика, момент-кинематическая характеристика.*

K. S. Goncharov*
PhD Student
A. M. Litvinenko*
Dr. Sc., Tech, Professor
**Voronezh State Technical of University*

SYNTHESIS OF THE ELECTRICAL MODULE OF THE STEERING DRIVE OF THE INFORMATION ROBOT

Approaches to the synthesis of an electrotechnical complex of an informational robot are considered, focusing on the interaction of its main subsystems: electric drives, control systems, and power supply. The analysis includes moment-kinematic and moment-energy characteristics of electric motors and their impact on drive dynamics and system responsiveness.
Keywords: *electric drive, energy torque characteristic, kinematic torque characteristic.*

Введение

Информационные роботы играют важную роль в современном промышленном и научном мире. Эти сложные устройства способны выполнять разнообразные задачи, от сборки деталей до выполнения хирургических операций, благодаря точным и надежным системам управления. Роботы обладают электротехническим комплексом, который обеспечивает их энергетическую автономность, движение и обработку информации. Оптимизация работы этого комплекса позволяет существенно повысить эффективность роботов, сделать их более адаптивными и устойчивыми к изменяющимся условиям окружающей среды.

Электротехнический комплекс робота должен не только обеспечивать энергетические потребности систем управления и приводов, но и эффективно интегрироваться с информационными системами для обработки данных в реальном времени. Этот подход требует создания агрегативной модели, которая объединяет все компоненты робота в единое целое и позволяет оптимизировать их работу. Агрегативная модель электротехнического комплекса предполагает взаимодействие различных подсистем, таких как приводы, источники энергии и информационные системы, для достижения максимальной производительности и надежности.

Агрегативная модель электротехнического комплекса информационного робота – это подход к построению общей структуры робота, при котором различные подсистемы (электроприводы, датчики, системы управления и энергообеспечения) рассматриваются как элементы единого целого. Основная идея такой модели заключается в интеграции всех компонентов робота, что позволяет оптимизировать их работу, повысить надежность системы и адаптировать ее к динамическим изменениям окружающей среды.

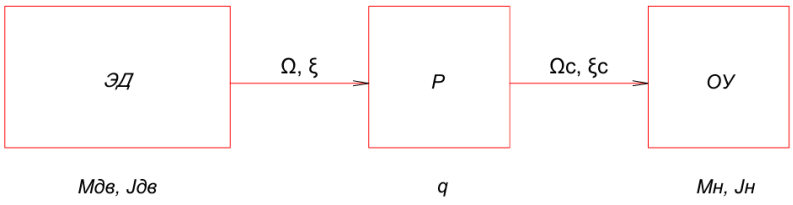


Рис. 1. Механическая система «двигатель – редуктор – объект управления»: ЭД – электродвигатель; Р – редуктор; ОУ – объект управления; $M_{дв}$ – полный момент двигателя, который приложен к данной механической системе; $M_н$ – статический момент нагрузки; $J_н$ – момент инерции объекта управления; q – передаточное число редуктора; Ω_c – скорость ОУ; ξ_c – ускорение ОУ

Основные принципы агрегативной модели:

Модульная структура: В агрегативной модели каждая из подсистем представляется как самостоятельный модуль с определенными функциями. Это могут быть приводы для перемещения, системы управления для координации движений, оптические системы для восприятия окружающей среды, а также системы питания. Модульный подход позволяет гибко адаптировать модель под различные задачи.

Интеграция систем: Основная задача агрегативной модели – обеспечить эффективное взаимодействие между всеми модулями. Например, работа электроприводов напрямую зависит от систем управления, которые в свою очередь обрабатывают информацию, поступающую от оптических систем. Все это должно функционировать в синергии для достижения оптимальных результатов.

Оптимизация энергетической эффективности: Один из ключевых моментов агрегативной модели – это рациональное распределение энергии между различными подсистемами. Учитывая ограниченные ресурсы, такие как батареи или внешние источники питания, модель помогает снизить энергопотребление, не жертвуя производительностью.

Динамическое управление: агрегативная модель позволяет использовать адаптивные и робастные методы управления, что делает систему способной к быстрой адаптации под внешние воздействия. Например, робот может изменять свою траекторию или способ взаимодействия с объектами в зависимости от поступающих данных с датчиков.

Материалы и методы

Приводная система является основной частью электротехнического комплекса информационного робота, обеспечивая его движение и маневренность. Она включает электроприводы, которые состоят из электродвигателей, редукторов и контроллеров. Управление этой системой требует учета динамических характеристик и точного регулирования параметров движения, таких как скорость и ускорение.

Рассмотрим приводную систему более подробно. На основе обобщенных характеристик можно получить достаточное суждение о двигателе и его динамических возможностях. Существует два типа обобщенных характеристик: момент-кинематическая (МК) и момент-энергетическая (МЭ). Момент-кинематическую характеристику можно описать уравнением:

$$\frac{\Omega}{\Omega_{x\cdot x}}+\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{x\cdot x}}+\frac{M}{M_{\text{п}}}=1,$$

где $\Omega_{x\cdot x} = M_{\text{п}}/F_{\text{дв}}$ – скорость холостого хода двигателя; $\varepsilon_{x\cdot x} = M_{\text{п}}/J_{\text{дв}}$ – ускорение холостого хода двигателя; $M_{\text{п}}$ – пусковой момент двигателя; $F_{\text{дв}}$ – коэффициент собственного демпфирования; $J_{\text{дв}}$ – момент инерции ротора двигателя.

Момент-кинематическая характеристика помогает определить связь момента M с ускорением ε и скоростью Ω.

Момент M является тем моментом, который затрачивается им на совершение полезной работы, вследствие чего этот момент называют «полезным» моментом.

Рассмотрим рис. 1.

Предварительно редуктор принимается как идеальная механическая передача. Это означает, что она является безлюфтовой, безынерционной и абсолютно жесткой, лишенной трения. При помощи следующего уравнения можно описать движение данной механической системы:

$$(J_{\text{дв}} + J_{\text{н}} / q^2)\varepsilon = M_{\text{дв}} - M_{\text{нд}} / q.$$

При помощи соотношений

$$\begin{cases}\Omega = \Omega_c q \\ \varepsilon = \varepsilon_c q\end{cases}.$$

уравнение может быть преобразовано к виду:

$$M_{\text{н}} - J_{\text{дв}}\varepsilon = \frac{M_{\text{н}} + J_{\text{н}}\varepsilon_c}{q}.$$

Момент, затрачиваемый на ОУ является разностью между моментом $M_{\text{дв}}$ и величиной крутящего момента $J_{\text{дв}}\varepsilon$. Крутящий момент требуется для того, чтобы передать ротору двигателя ускорение ε. Так как трением в редукторе и инерционностью его подвижных элементов в первом приближении можно пренебречь, то других затрат момента в системе не будет. То есть левая часть уравнения (4) является частью полного момента, который характеризует воздействие двигателя на ОУ:

$$M = M_{\text{дв}} - J_{\text{дв}}\varepsilon.$$

Двигатель располагает этим воздействием при совершении полезной работы на ОУ, а значит оно является полезным в этой системе. Таким образом, M – это полезный располагаемый момент электродвигателя.

Также можно сказать, что правая половина уравнения (4) указывает на то, что момент М нужен для преодоления приведенного статического момента $M_{\text{н}}/q$ и на сообщение ОУ с моментом инерции $J_{\text{н}}$ ускорения ε_c. Суммарный момент, который приведен к валу ОУ, можно записать как:

$$M_c = M_{\text{н}} - J_{\text{н}}\varepsilon_c.$$

Следовательно, можно записать:

$$M = M_c / q.$$

Это уравнение означает, что если движение механической системы ничем ранее не обусловлено, то приведенный требуемый момент будет равен располагаемому полезному моменту. Исходя из вышепредставленных уравнений можно сказать, что располагаемый момент М является функцией скорости и ускорения на валу электродвигателя, а требуемый момент является функцией скорости и ускорения на ОУ. То есть, если движение системы заранее обусловлено, то уравнение (7) может не выполняться, потому что электродвигатель будет обладать или дефицитом по моменту, или его запасом.

С учетом зависимости полного момента $M_{\text{дв}}$ от линейной скорости и уравнения (1) можно сделать вывод, что полезный момент электродвигателя будет равен:

$$M = M_{\text{п}} - F_{\text{дв}}\Omega - J_{\text{дв}}\varepsilon.$$

Отсюда получаем обобщенную характеристику (1), разделив на $M_{\text{п}}$ правую и левую части выражения (8).

Отметим характерные случаи обобщенной момент-кинематической характеристики.

Двигатель, момент-кинематические характеристики которого приняты линейными является идеальной моделью. Реальные двигатели имеют только нелинейные характеристики. Для чего тогда рассматриваются идеальные характеристики, если они не подходят для реальных двигателей. На самом деле расчеты и исследования для двигателей с нелинейными характеристиками могут быть успешно промоделированы и рассчитаны при помощи линейных характеристик при достаточной точности. В основе этих расчетов лежит метод кусочно-линейной аппроксимации.

Результаты исследования

Момент-кинематические характеристики могут быть получены экспериментально. Для этого нужно определить момент инерции ротора электродвигателя, провести осциллографирование разгона электродвигателя во времени при скачкообразном изменении управляющего сигнала. Уровень «скачка» принимается равным наибольшему допустимому сигналу для

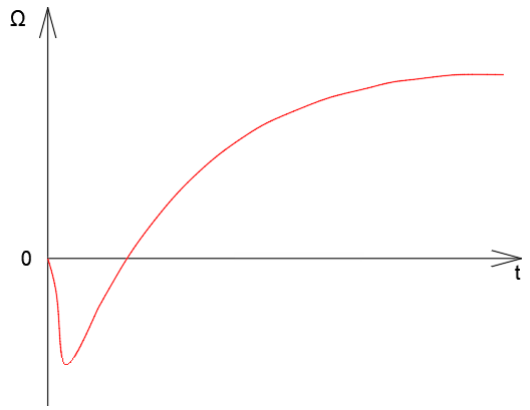


Рис. 2. График скорости при реверсе двигателя

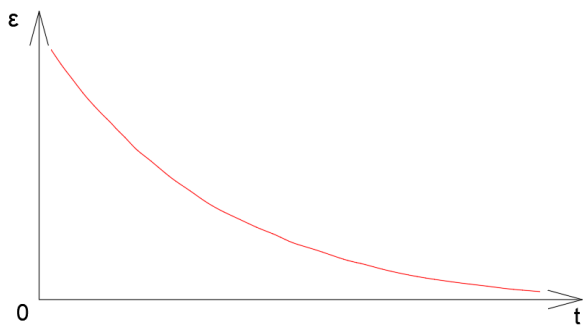


Рис. 3. График ускорения при реверсе двигателя

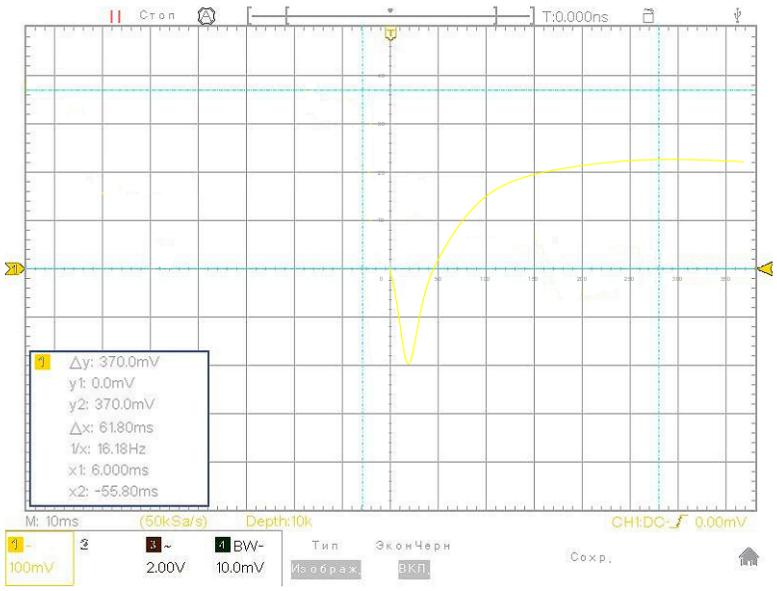


Рис. 4. Осциллографический график скорости

данного двигателя, так как обычно важными являются именно предельные момент-кинематические характеристики. Далее нужно определить искомые МК-характеристики:

1. Строится характеристика изменения скорости двигателя $\Omega = \Omega(t)$ при реверсировании (рис. 2).

2. Определение характеристики ускорения при разгоне $\varepsilon = \varepsilon(t)$ (рис. 3).

3. Из этих двух зависимостей исключается параметр t и определяется предельная характеристика холостого хода по точкам.

4. Определяется пусковая предельная характеристика, которая является прямой под углом $\alpha = \text{arctg}J_{\text{дв}}$. Предельное значение пускового момента электродвигателя $M_{\text{п}}$ является точка пересечения с осью ОМ.

5. По двум найденным характеристикам можно определить и третью – предельную механическую.

Две полученные характеристики являются нелинейными. Следовательно, можно сделать вывод, что предельная момент-кинематическая поверхность будет являться криволинейной.

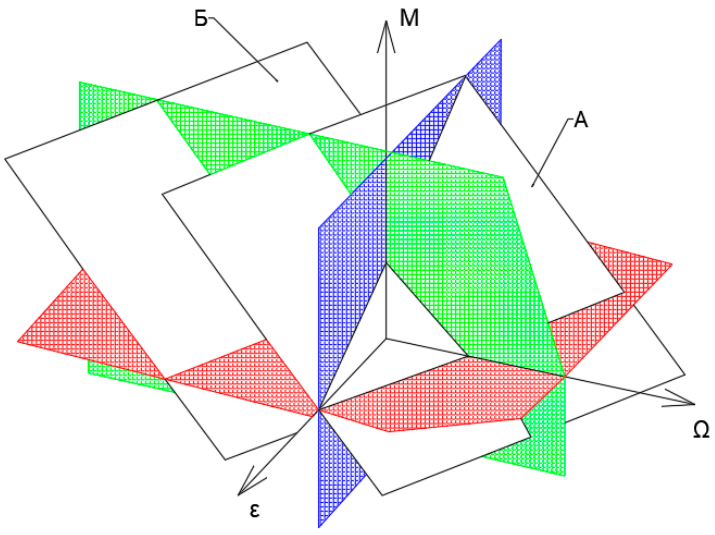


Рис. 5. МК-плоскости двигателя

Для синтеза модуля был проведен эксперимент, в ходе которого был получен график скорости на осциллографе (рис. 4).

В пространственных координатах рис. 5 обобщенная момент-кинематическая характеристика представляет плоскость А, которая является геометрическим местом всех момент-кинематических двигательных и тормозных, статических и динамических состояний, которые могут быть воспроизведены двигателем при данном управляющем сигнале. Момент-кинематическая плоскость, которая соответствует нулевому управляющему сигналу, проходит через начало координат. Эта плоскость называется плоскостью динамического торможения двигателя. МК-плоскость для управляющего сигнала «обратной полярности» (плоскость Б) центрально-симметрична МК-плоскости, которая соответствует равному по величине сигналу «прямой полярности». Такие предельные МК-плоскости определяют границы полного пространства располагаемых МК-состояний данного двигателя.

Выводы

Момент-кинематические характеристики играют важную роль при описании движения механических систем и являются важными инструмента анализа динамики сложных механизмов. В данной статье были рассмотрены структура приводной системы и главные методы построения момент-кинематических характеристик. В ходе эксперимента на осциллографе была получена характеристика, которая показывает, что подобранные методы и параметры были выбраны верно.

Библиографический список

1. *Воронин С. Г.* Электропривод летательных аппаратов: учебно-методический комплекс. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. 171 с.

2. *Беляев Б. М.* Современные методы проектирования следящих систем и регуляторов: учеб. пособие. Л.: СЗПИ, 1985. 80 с., 20 ил.

3. Основы проектирования и расчета следящих систем: учебник для техникумов / В. И. Смирнова, Ю. А. Петров, В. И. Разинцев. М.: Машиностроеиие, 1983. 295 с., ил.

4. *Овсянников Е. М.* Электрический привод: учебник. М.: ФОРУМ, 2011. 224 с.

5. *Чемоданов Б. К.* Следящие приводы. В 2-х кн. М.: Энергия, 1976.

6. Управление электроприводами: учеб. пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. 1982. 392 с.

7. *Зайцев Г. Ф.* Синтез следящих систем высокой точности. Киев, Техника, 1971. 191 с.

8. *Тимофеев Б. П., Сачков М. Ю.* Передаточные механизмы приводов. СПб.: ИТМО, 2015. 103 с.

9. Патент РФ № 2399017 МПК7 F 42B 15/01 «Следящий рулевой электропривод» (ЗАО «НИИ МЕХАНОТРОНИКИ-АЛЬФА-НЦ», г. Воронеж) / А. В. Булатов, А. С. Гончаров, В. В. Романов, С. М. Миронов, А. И. Попов // Бюл. 25. 10.09.2010.

10. Проектирование следящих систем / Л. В. Рабинович [и др.]. М.: Машиностроение, 1969. 498 с.

УДК 62-932.4, 621.6.04 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-114-118**

И. П. Лян*
кандидат технических наук, научный сотрудник
** Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА ВИБРАЦИОННОЙ МАШИНЫ С СЫПУЧЕЙ СРЕДОЙ

Рассмотрены подходы к построению имитационных моделей сыпучей среды в приложении к исследованию взаимодействия вибрационной машины с обрабатываемым материалом в условиях возбуждения колебаний вблизи резонансной частоты рабочего органа. Создана математическая модель на основе метода дискретных элементов. На основе анализа результатов расчета определены значения силы реакции рабочего органа при различных режимах движения материала.
Ключевые слова: *вибрационная технологическая машина, сыпучая среда, метод дискретных элементов.*

I. P. Lyan*
PhD, Tech., Research Employee
**Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences named after A. A. Blagonravov*

NUMERICAL SIMULATION OF THE INTERACTION OF THE WORKING BODY OF A VIBRATING MACHINE WITH A BULK MEDIUM

Approaches to the construction of simulation models of a bulk medium are considered in application to the study of the interaction of a vibrating machine with a processed material under conditions of excitation of vibrations near the resonant frequency of the working organ. Using the discrete element method, a mathematical model was constructed. Based on the analysis of the calculation results, the reaction forces of the working body under various modes of movement of the material are determined.
Keywords: *vibrating machine, bulk medium, discrete element method.*

Вибрационные транспортно-технологические машины с дебалансными вибровозбудителями, обрабатывающие различные сыпучие или гранулированные материалы, нашли широкое распространение в различных отраслях промышленности [1–4]. Большинство таких машин работает в зарезонансной области частот возбуждения, что позволяет при моделировании и создании таких машин учитывать ограниченное количество свойств обрабатываемой среды.

Реализация резонансных режимов колебаний рабочего органа позволяет добиться существенного повышения энергоэффективности вибрационных машин, однако в процессе автоматической настройки и поддержания резонансного режима [5, 6] может происходить существенное изменение параметров колебаний, что приводит к изменению поведения материала на рабочем органе (движение с отрывом, без отрыва, виброкипение и т. д.). Для создания достоверной математической модели резонансной вибрационной машины необходимо вводить более подробные модели обрабатываемой среды, позволяющие учитывать также зависимость поведения обрабатываемого материала от параметров колебаний.

Среди множества подходов ко моделированию сыпучей среды можно выделить:

– модели в виде системы нескольких массивных тел, соединенных различными упругими и диссипативными связями (пружинами, демпферами, элементами сухого трения), характеристики которых подлежат определению для конкретных параметров колебаний рабочего органа [2, 3, 7];

– модели на основе динамки сплошных сред, которые основаны на предположении, что материал под действием вибрации ведет себя либо как дилатантная жидкость, либо как тяжелый газ (в случае наличия достаточно больших амплитудных ускорений) [4, 8].

Рассмотренные подходы затруднительно использовать для моделирования сыпучей среды в условиях, когда возможно существенное изменение параметров колебаний, так как в этом

случае возникает необходимость определения параметров модели для каждого из возможных режимов ее движения.

В связи с прогрессом в области вычислительной техники существенное развитие получил подход на основе метода дискретных элементов (МДЭ, DEM) [9–11], в котором материал моделируется множеством дискретных частиц, для каждой из которых задается геометрические, массовые, упругие и диссипативные параметры. Преимущества МДЭ включают универсальность и практически неограниченные возможности диагностики моделируемых явлений, а вычислительные затраты можно снизить за счет использования параллельной обработки данных [11].

Расчетная схема для задачи определения сил, действующих со стороны материала на вибрирующую поверхность представлена на рис. 1. На расчетной области длинной L_x и высотой L_y размещено $N = (N_x N_y + 3)$ частиц. Для каждой частицы задается радиус R, значения модуля Юнга E и коэффициенты Пуассона ν и сухого трения для каждой пары материалов. Упругое и диссипативное взаимодействие частиц описывается моделью Герца – Кувабара – Коно [12]. В результате была получена система уравнений движения частиц, записанная в конечных разностях. Три частицы-границы (далее просто границы, имеют нижний индекс $b \in \{1,2,3\}$: 1 – нижняя частица, 2 – левая, 3 – правая) и выполняют роль рабочего органа. Границы имеют радиус $R_b >> R_m$ (индекс $m \in [1,\ N-3]$ будет относиться к частицам среды).

Нижняя граница совершает заданные вертикальные гармонические колебания с амплитудой A и частотой f : $r_{1,x}(t) = L_x / 2$; $r_{1,y}(t) = -R_1 + A\sin(2\pi f t)$; $v_{1,x}(t) = 0$; $v_{1,y}(t) = 2\pi A f \cos(2\pi f t)$. Остальные частицы являются частицами моделируемой среды и формируют прямоугольник из N_x частиц по оси Ox и N_y частиц по оси Oy, который расположен симметрично относительно боковых границ и на высоте H от поверхности нижней границы. Каждый из центров частиц среды в начальный момент времени располагается на расстоянии $d > 2R_m$ от соседней частицы. В процессе расчета частицы падают на нижнюю границу под действием силы гравитации, а затем распределяются по ней.

Для численного решения уравнений движения частиц среды предложен алгоритм на основе метода Адамса – Мултона 4-го порядка. На первом этапе параметры движения системы вычисляются методом Рунге – Кутты 4-го порядка. Далее интегрирование системы уравнений производится по алгоритму, который, в свою очередь, может быть разделен на шаг предиктора (решение на основе полиномиальной экстраполяции правых частей уравнений), шаг корректора (повторное решение на основе интерполяции правых частей уравнений), заключительный шаг (вычисляются значения, используемые на следующем шаге по времени).

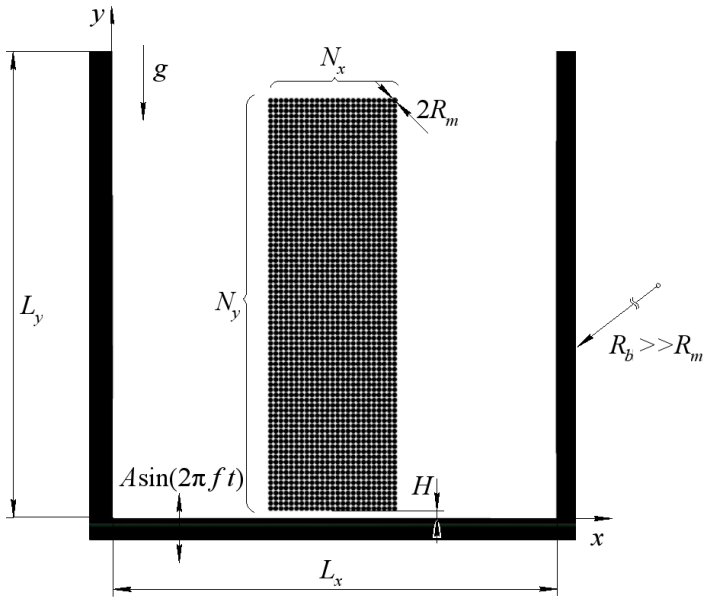


Рис. 1. Расчетная схема в начальный момент времени

Моделирование производилось на расчетной области с габаритами $L_x = L_y = 1$ м, для $N = 2000 + 3$ частиц, моделирующие латунную дробь с параметрами: $m_m = 4 \cdot 10^{-3}$ кг, радиус $R_m = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $E_m = 100$ ГПа, $\nu_m = 0.25$. Коэффициенты трения между частицами и среды $\mu_{11} = 0.2$, а между частицами среды и границами $\mu_{12} = 0.4$. Границы имели параметры: $m_b = 100$ кг, радиус $R_b = 9000$ м, $E_b = 200$ ГПа, $\nu_b = 0.3$. Интегрирование уравнений движения проводилось с шагом $h = 2 \cdot 10^{-4}$ с.

Результаты и обсуждение. В рамках исследования был проведен численный эксперимент с целью изучения влияния амплитуды виброускорений на взаимодействие рабочего органа вибрационной машины и обрабатываемого материала. Вычисления проводились при фиксированной частоте колебаний $f = 15$ Гц, которая соответствует диапазону частот, рекомендуемому для процессов вибрационного транспортирования.

На рис. 2 представлены зависимости относительной силы реакции нижней границы $F_{1,n}/Mg$ от времени, которые иллюстрируют тенденции, выявленные в ходе численных экспериментов. На каждом из графиков показан временной отрезок продолжительностью 0.6 с в области установившихся колебаний в порядке увеличения виброускорения.

Анализ результатов численного эксперимента позволяет сделать следующие выводы:

– при значениях $a_\omega < g$ происходит движение без отрыва материала от поверхности, зависимости сил реакции опоры имеют характер, близкий к гармоническому (рис. 2, *а*);

– в диапазоне $8.5 < a_\omega < 24.5$ м·с$^{-2}$ наблюдется режим, при котором на одном периоде колебаний рабочего органа сила реакции имеет величину существенно (в 2–4 раза) большую, чем на следующем периоде (рис. 2, *б*); при этом при $g < a_\omega < 2g$ происходит отрыв материала от поверхности в среднем один раз за два периода колебаний;

– при дальнейшем увеличении виброускорения, в области $a_\omega > 2g$ отрыв материала наблюдается на каждом периоде колебаний, а зависи-

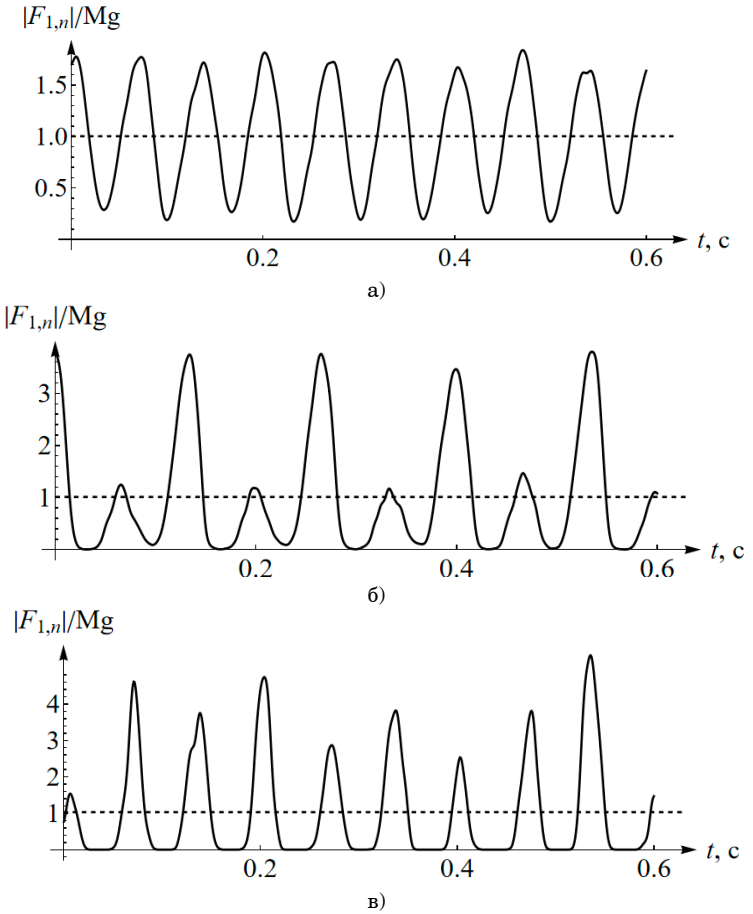


Рис. 2. Относительная сила реакции нижней границы от времени при: а) при значении виброускорения $a_\omega = 6.212$ м·с$^{-2}$; б) $a_\omega = 17.747$ м·с$^{-2}$; в) $a_\omega = 79.86$ м·с$^{-2}$

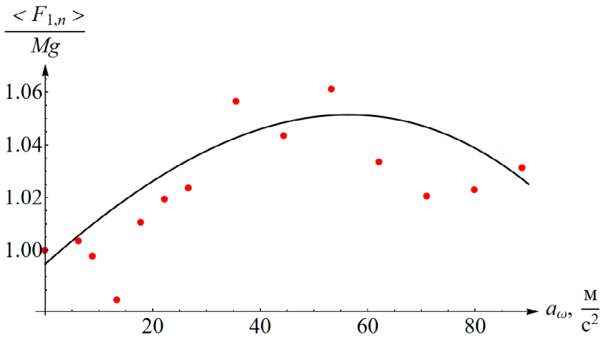


Рис. 3. Зависимость средней силы реакции рабочего органа от амплитуды виброускорения

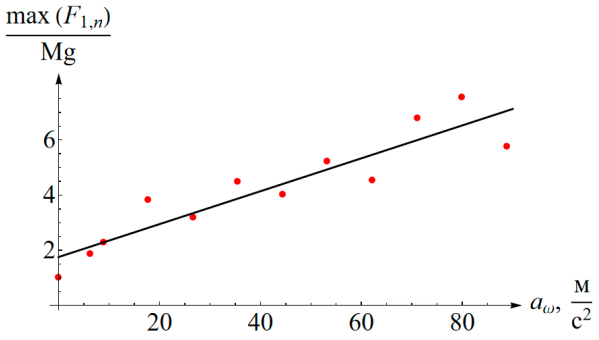


Рис. 4. Зависимость максимальной силы реакции рабочего органа от амплитуды виброускорения

мости приобретают характер пульсаций, с частотой, равной частоте колебаний поверхности (рис. 2, *в*);

– по мере увеличения виброускорения продолжительность фазы полета возрастает.

Получены зависимости силы реакции рабочего органа, усредненной за 10 периодов колебаний (рис. 3), и ее максимальных значений (рис. 4) от амплитуды виброускорения. Точками показаны результаты численного эксперимента, а линия представляет собой аппроксимации данных квадратичной (рис. 3) и линейной (рис. 4) функцией.

Анализ зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

– значение усредненных значений силы реакции отличались от статического значения Mg в пределах 7%, при этом зависимость близка к квадратичной;

– значения силы $F_{1,n}$ в точках максимума возрастают пропорционально виброускорению a_ω, при этом по мере увеличения виброускорения дисперсия значений сил в точках максимума растет, что может объясняться возникновением виброкипения материала.

На рис. 5 приведен стоп-кадр, иллюстрирующий поведение сыпучей среды в режиме виброкипения в момент времени t=0.17 с (рис. 2, *в*).

Поведение среды представляется хаотичным, аналогичным поведению кипящей жидкости, что объясняет возрастание дисперсии пиковых значений силы при увеличении виброускорения (рис. 2)

Выводы. В рамках исследования рассмотрены различные подходы к построению имитационных моделей сыпучей среды в приложении к исследованию взаимодействия вибрационной машины с обрабатываемым материалом в условиях возбуждения колебаний вблизи резонансной частоты рабочего органа. Создана математическая модель на основе метода дискретных элементов. Для численного решения уравнений был разработан программный пакет на языке C++. С помощью разработанного программного обеспечения были получены и проанализированы силы, действующие между сыпучим материалом и рабочим органом вибрационной машины. Поведение сыпучей среды соответствует общепринятым представлениям и теоретическим ожиданиям.

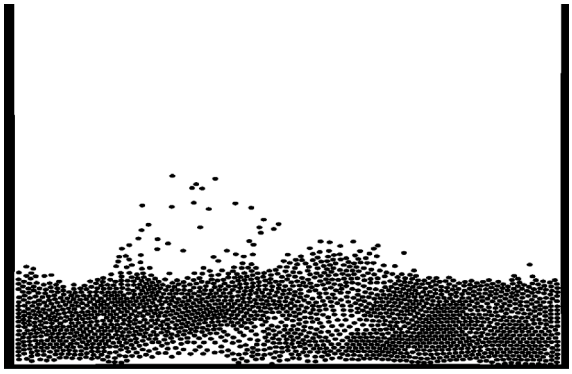


Рис. 5. Сыпучая среда в режиме виброкипения

Анализ полученных данных позволил выявить основные закономерности взаимодействия рабочего органа и обрабатываемого материала, что может быть использовано для оптимизации работы вибрационных машин и повышения их эффективности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00333 (https://rscf.ru/project/24-19-00333).

Библиографический список

1. *Блехман И. И.* Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. СПб.: Руда и металлы, 2013. 640 с.

2. *Спиваковский А. О., Гончаревич И. Ф.* Вибрационный конвейеры, питатели и вспомогательные устройства М.: Машиностроение, 1972. 272 с.

3. *Блехман И. И., Джанелидзе Г. Ю.* Вибрационное перемещение. М.: Наука, 1964. 410 с.

4. *Яцун С. Ф., Локтионова О. Г.* Вибрационные машины и технологии для переработки гранулированных сред. Старый Оскол: ТНТ, 2018. 295 с.

5. *Пановко Г. Я., Шохин А. Е.* Динамика резонансных вибромашин с самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2020. 168 с.

6. *Лян И. П.* Поддержание резонансных режимов работы транспортно-технологических вибрационных машин при переменных параметрах обрабатываемого материала: дис. ... канд. техн. наук: 2.5.2. М., 2023. 123 с.

7. *Фролов В. Ф.* Моделирование дисперсных материалов. Л.: Химия, 1987. 283 с.

8. *Белоцерковский О. М.* Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Физ.-мат. лит., 1994. 448 с.

9. *Cundall P. A., Strack O. D. L.* A distinct element model for granular assemblies // Geotechnique. 1979. 109 p.

10. *Клишин С. В.* Применение метода дискретных элементов при анализе гравитационного движения гранулированного материала в сходящемся канале // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 12. С. 273–277.

11. *Верзилина О. А.* Применение метода дискретных элементов для моделирования виброударных систем // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2018. Т. 45, № 1. С. 103–110.

12. *Джонсон К.* Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 509 с.

УДК 681.2 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-119-121**

В. М. Медунецкий*
доктор технических наук, профессор
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ

В данной статье рассмотрены варианты захватных устройств стержневого типа для манипуляторов промышленных роботов. Предложено использовать сменные элементы для таких захватных устройств с целью расширения их функциональных возможностей. В этом случае следует учитывать характер микрорельефа захватных элементов. Также отмечено, что оценивать микрорельеф следует по непараметрическим критериям.
Ключевые слова: *захватные устройства манипуляторов, сменные элементы захватов, микрорельеф поверхности, непараметрические критерии микрорельефа.*

V. M. Medunetsky*
Dr. Sc., Tech., Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

PROVISION OF ADDITIONAL FUNCTIONAL CAPABILITIES OF ROBOT MANIPULATORS

In this article variants of rod-type gripping devices for manipulators of industrial robots are considered. It is suggested to use interchangeable elements for such gripping devices in order to expand their functionality. In this case it is necessary to take into account the character of microrelief of gripping elements. It is noted that microrelief should be evaluated by nonparametric criteria.
Keywords: *manipulator gripping devices, replaceable gripping elements, surface microrelief, nonparametric criteria of microrelief.*

В современных условиях для предприятий, которые выпускают многономенклатурную продукцию, особо важна производственно-технологическая гибкость. Эта задача достаточно сложная и имеет различные направления по ее решению. Каждое направление содержит соответствующие возможности по совершенствованию технологических процессов и их оптимизации. Решая задачи повышения технологической гибкости, следует обеспечивать интеграцию различных вариантов в существующих условиях для получения комплексного технического и экономического эффекта.

Особая значимость повышения технологической гибкости имеется на сборочно-комплектующих производственных линиях, так как они существенно влияют на себестоимость изделий. Целью преобразования производственно-технологического оборудования является необходимость обеспечить быстрый переход от выпуска одного промышленного изделия на выпуск другого. Это очень актуально для предприятий выпускающих промышленные изделия небольшими партиями с широкой номенклатурой.

Надо отметить, что в настоящее время немалая роль в обеспечении технологической гибкости отводится так называемым универсальным (но все же в определенном диапазоне) захватам роботов-манипуляторов, которые расширяют их функциональные технологические возможности.

К примеру, можно привести захваты стержневого («пинцетного») типа. Они относительно универсальны для сборки миниатюрных изделий и схематично представлены на рис. 1.

Захватные элементы приводятся в движение за счет использования пневмопривода. Формы направляющих пазов обеспечивают требуемую зависимость между усилием захвата и габаритом захватываемой детали. На рис. 2 показан захват, конструкция которого имеет три захватных элемента.

На рис. 3 схематично изображен двухстержневой захват, в конструкции которого направляющие обеспечивают плоскопараллельное

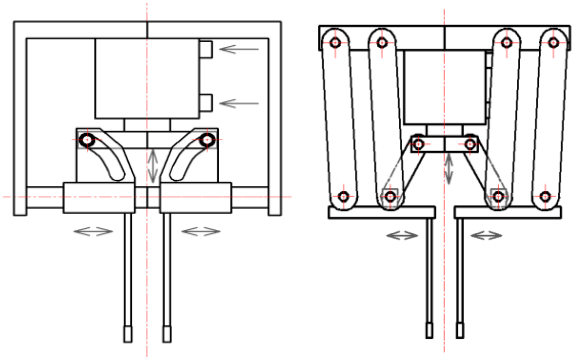


Рис. 1. Схематичное изображение захватов стержневого типа

Рис. 2. Трехстержневой захват для малогабаритных деталей

движение, переменное усилие захвата деталей обеспечивается специальным рычажным механизмом, а его передаточная функция определяется геометрическими соотношениями размеров его составных частей.

На рис. 4 представлен общий вид манипулятора робота Adept Cobra 600 с универсальным захватным устройством.

Практический опыт показывает, что для миниатюрных деталей необходимо учитывать шероховатость поверхности захватных элементов и захватываемых объектов (деталей). Поэтому в лаборатории Университете ИТМО были про-

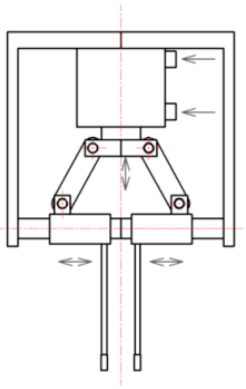


Рис. 3. Вариант схемы двухстержневого захвата с плоскопараллельным движением захватных элементов

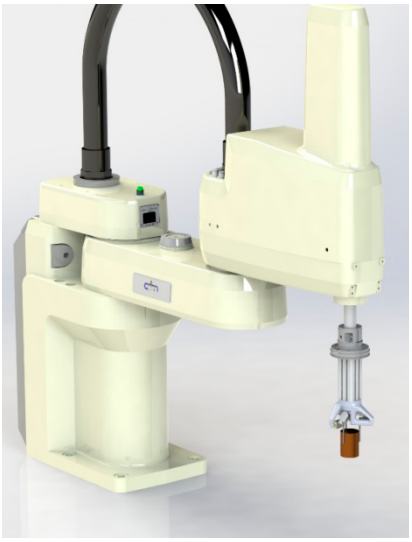


Рис. 4. Общий вид манипулятора робота Adept Cobra 600 с универсальным захватным устройством

ведены экспериментальные исследования по влиянию микрорельефа поверхности на способность «удерживать» детали с постоянно заданным усилием. Для этой цели была спроектирована и изготовлена установка, с помощью которой можно оценивать влияние характера поверхности микрорельефа захватных элементов при заданном постоянном усилии захвата и веса объекта (детали) на способность противодействию их смещению (выход из состояния покоя к движению).

Следует отметить, что в классических работах [1–3] приводятся сведения о влиянии на коэффициент трения скольжения параметров шероховатости при сопряжении поверхностей. В этих работах указывается, что при увеличении значений параметров шероховатости сопряжение поверхностей практически полностью зависит от механического сцепления микронеровностей. На практике подтверждено,

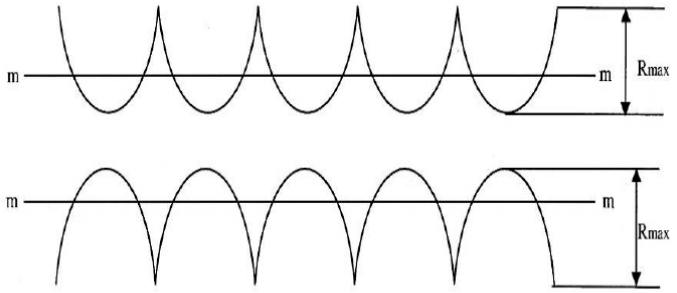


Рис. 5. Характерные профили микрорельефа двух поверхностей с одинаковыми параметрическими критериями, но с различными функциональными свойствами [4]

что общепринятые параметрические критерии, такие как Ra, Rz и Rmax, не полностью отражают связь с функциональными свойствами поверхностей. Они не являются достаточным, так как могут обладать различными функциональными свойствами.

В качестве примера на рис. 5 приводятся характерные профили двух поверхностей, имеющие одинаковые параметры Ra, Rz и Rmax. Однако они имеют отличающиеся функциональные свойства.

Изначально этими вопросами в нашей стране занимался профессор В. А. Валетов и его ученики. Ими было проведено достаточно большое исследований по непараметрической оценки микропрофиля поверхностей и было рекомендовано ими ввести статистические характеристики профилей микронеровностей, а также описывать их на основе плотностей распределения ординат и тангенсов углов наклона [5, 6]. Таким образом, обеспечивается некоторая взаимосвязь комплексной информации о микропрофиле поверхности и ее функциональными характерными свойствами. Этот эффект следует использовать при выборе и назначении поверхностей захватных элементов для удержания захватываемых малогабаритных объектов (деталей с малыми массо-габаритными характеристиками).

При этом для достижения требуемых характеристик рабочих поверхностей захватов следует выбрать соответствующий материал и соответствующую технологию их изготовления. Возможность применения различных технологических способов изготовления позволяет повысить степень удержания деталей захватным устройством без изменения их конструкции и может быть использована на существующих технических решениях, которые используются на практике в настоящее время.

Важно отметить, что в некоторых вариантах сборочно-комплектующих технологических процессов следует использовать захваты со сменными элементами, которые проектируются под конкретные типы деталей. В таких вариантах появляется возможность выбирать не только определенную конфигурацию захватной части манипулятора, но и, что очень важно, назначать конкретный микрорельеф его рабочей поверхности. Это расширяет технологические характеристики захватных устройств.

В итоге следует отметить, что предложенные и кратко рассмотренные в статье технические решения позволяют обеспечить дополнительные функциональные возможности роботов-манипуляторов при использовании их на сборочных производственно-технологических операциях.

Библиографический список

1. *Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С.* Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

2. *Крагельский И. В., Михин Н. М.* Узлы трения машин: справочник. М.: Машиностроение, 1984, 280 с.

3. *Комбалов В. С.* Влияние шероховатости тел на трение и износ. М.: Наука, 1974. 109 с.

4. *Валетов В. А., Третьяков С. Д.* Исследование закономерностей микрогеометрии деталей при трении-скольжении // Научно-технический вестник. 2001. № 3. С. 79–82.

5. *Мусалимов В. М., Валетов В. А.* Динамика фрикционного взаимодействия. СПб.: ИТМО, 2006, 191 с.

6. *Валетов В. А.* Проблемы оптимизации микрогеометрии поверхностей деталей для обеспечения их конкретных функциональных свойств // ABC Journal of Advanced Research. Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. Т. 58, вып. апрель 2015. No. 4. С. 250–267. ISSN 0021-3454.

УДК 681.5.01 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-122-125**

А. Р. Семенов*
аспирант
В. С. Коломойцев*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

К ВОПРОСУ НЕОБХОДИМОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТИЗАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРОЦЕССЕ

В статье рассмотрено влияние автоматизации и роботизации на производственные процессы в современных условиях. Описаны преимущества автоматизации, включающие снижение затрат на рабочую силу, повышение качества продукции и скорость производства. Рассмотрены этапы автоматизации производственного процесса, начиная с разработки 3D-модели и заканчивая контролем качества. Поднят вопрос вызовов, связанных с изменением структуры рынка труда в результате автоматизации, и необходимость переобучения работников. В заключении подчеркнута важность интеграции автоматизации в производственный процесс для повышения конкурентоспособности и устойчивости предприятий, а также необходимость совместной работы компаний и государственных органов над подготовкой кадров для новых условий.
Ключевые слова: *автоматизация, роботизация, производственные процессы, эффективность производства, качество продукции, контроль качества, рынок труда, конкурентоспособность.*

A. R. Semenov*
PhD Student
V. S. Kolomoitcev*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ON THE ISSUE OF THE NEED FOR AUTOMATION AND ROBOTIZATION IN THE PRODUCTION PROCESS

The article examines the impact of automation and robotization on production processes in modern conditions. The benefits of automation are described, including reduced labor costs, improved product quality and production speed. The stages of automation of the production process are considered, starting with the development of a 3D-model and ending with quality control. The issue of challenges related to changes in the structure of the labor market as a result of automation and the need for retraining of employees is raised. In conclusion, the importance of integrating automation to increase the competitiveness and sustainability of enterprises is emphasized, as well as the need for companies and government agencies to work together to train personnel for new conditions.
Keywords: *automation, robotization, production processes, production efficiency, product quality, quality control, labor market, competitiveness.*

Введение

В последние десятилетия мир стал свидетелем значительного изменения производственных процессов благодаря широкому внедрению в них автоматизации и робототизации. Эти технологии, основанные на использовании алгоритмов и механических систем, становятся неотъемлемой частью современного производства.

Автоматизированный процесс – это процесс, позволяющий построить системы, в которых операции выполняются с минимальным участием человека, благодаря использованию технологий, таких как программное обеспечение, роботы и сенсоры. Автоматизация позволяет значительно повысить производительность, снизить затраты и минимизировать человеческий фактор, что способствует снижению числа ошибок и увеличению стабильности производственных процессов. Роботизация, в свою очередь, открывает новые горизонты для реализации сложных и высокоточных операций, которые невозможно или крайне сложно выполнить вручную.

Рассмотрим влияние автоматизации на структуру промышленных процессов, а также как, в целом, может быть проведен указанный процесс.

Автоматизация производства

Автоматизация производства обладает множеством преимуществ. Во-первых, она способствует снижению затрат на рабочую силу, так как один специалист может управлять несколькими производственными линиями [1]. Это особенно актуально в условиях нехватки квалифицированных кадров, где автоматизация может служить решением проблемы.

Во-вторых, автоматизация позволяет повысить качество продукции, сокращая процент брака [2]. Это не только снижает затраты на переработку, повышая производительность, за счет отсутствия временных затрат на переналадку оборудования, но и увеличивает удовлетворенность клиентов.

В-третьих, автоматизированные системы обеспечивают высокую скорость производства, что является критически важным в условиях глобальной конкуренции [3]. Быстрая адаптация к изменениям в спросе и возможность масштабирования производства становятся важными конкурентными преимуществами. Например, в автомобилестроении использование роботов для сварки и сборки позволяет сократить время на производство и повысить производительность.

Так, например, в результате внедрения автоматизации и роботизации на заводе «КАМАЗ», по их отчетным данным, удалось достичь значительных результатов [4]. По данным, представленным компанией, произошло увеличение производительности на 18% за счет повышения скорости и качества выполнения операций, что позволило увеличить прибыль от продажи запасных частей на +22,6% [5].

Пример завода «КАМАЗ» демонстрирует, как автоматизация и роботизация могут существенно повысить эффективность производственных процессов в России. Внедрение современных технологий позволяет не только улучшить качество продукции, но и сократить затраты, что является ключевым фактором в условиях конкурентного рынка.

Этапы автоматизации

Жизненный цикл изделия (ЖЦИ) охватывает все этапы существования продукта, начиная с исследования и разработки, через проектирование и производство, до маркетинга, эксплуатации и утилизации. Каждый этап важен для успешного создания и управления продуктом, а эффективное управление ЖЦИ позволяет повысить конкурентоспособность и удовлетворенность потребителей. Включение экологических аспектов в утилизацию также становится все более значимым в современных условиях [6].

Автоматизированный производственный процесс начинается с проработки техзадания, за которым следует создание 3D-модели и технического процесса с использованием специализированных программных решений. На данном этапе минимизация человеческого фактора играет ключевую роль в снижении вероятности ошибок. Процесс включает несколько последовательных этапов: 3D-печать, обработка с помощью автоматизированных производственных единиц и контроль качества с помощью контактного и не контактного способа.

Рассмотрим этапы подробнее:

1. *Разработка 3D-модели.* На первом этапе заказчик предоставляет техническое задание, которое затем преобразуется в 3D-модель с использованием CAD-систем. В этом процессе важным является применение алгоритмов для топологической оптимизации, что позволяет минимизировать вес детали, сохраняя при этом ее прочностные характеристики. Это особенно актуально для высокотехнологичных отраслей, таких как аэрокосмос и автомобилестроение, где каждый грамм продукции имеет значение. Использование таких технологий позволяет не только улучшить эксплуатационные характеристики, но и сократить затраты на материалы.

2. *Создание управляющей программы.* На основе 3D-модели формируется управляющая программа для 3D-принтера. Эта программа обеспечивает высокую скорость и точность изготовления, что в свою очередь способствует снижению затрат на материалы и время производства. Применение различных технологий 3D-печати, таких как Fused Deposition Modeling (FDM), Stereolithography (SLA) и Selective Laser Sintering (SLS), позволяет выбрать наиболее подходящий метод в зависимости от требований к конечному продукту. Это также открывает возможности для создания сложных геометрических форм, которые невозможно было бы реализовать традиционными методами.

3. *Производственный процесс.* После завершения печати заготовка передается на участок растачивания, где осуществляется обработка до требуемых параметров. Использование автоматизированных манипуляторов и станков с числовым программным управлением (ЧПУ) значительно повышает точность операций и снижает процент брака. Это особенно важно в условиях высоких стандартов качества, предъявляемых к современным изделиям. Благодаря автоматизации, производственные линии стано-

вятся более гибкими и способны быстро адаптироваться к изменениям в спросе.

4. *Контроль качества.* На этапе контроля качества применяются системы машинного зрения, которые обеспечивают высокую степень надежности и точности в выявлении дефектов. Эти системы способны быстро и точно анализировать продукцию, что минимизирует риск выпуска бракованной продукции и повышает доверие потребителей к бренду. Внедрение таких технологий позволяет не только улучшить качество, но и сократить время, необходимое для проверки, что в свою очередь увеличивает общую производительность.

5. *Финишное покрытие и окончательная проверка.* Завершение производственного процесса включает финишное покрытие и окончательную проверку готовой продукции. Автоматизация этих процессов позволяет достичь высокого уровня качества и однородности, что является критически важным для многих отраслей, таких как автомобилестроение и аэрокосмическая промышленность. Процессы, такие как порошковая покраска или анодирование, могут быть также автоматизированы, что обеспечивает равномерное и качественное покрытие.

Влияние автоматизации и робототизации на смежные области

Несмотря на множество положительных аспектов, автоматизация вызывает опасения в отношении влияния на рынок труда. По оценкам Росстата, до 10 тыс. работников могут столкнуться с необходимостью смены профессии [7]. Это подчеркивает необходимость переобучения и повышения квалификации работников, чтобы адаптироваться к новым требованиям рынка. В то же время автоматизация создает новые рабочие места, требующие высококвалифицированных специалистов в области программирования, обслуживания и ремонта автоматизированных систем [1]. Также заметен большой разрыв в опытных кадрах и молодых специалистах, из-за чего в области производства наблюдается нехватка кадров для большого количества работы. Так, например, работников, находящихся в возрасте до 35 лет, в отрасли «Обрабатывающие производства» на 2020 г. – 29,94%, а в 2022 г. уже 27,47%.

Необходимо отметить, что переход к автоматизированному производству требует от работников новых навыков, таких как умение работать с современными технологиями и программным обеспечением. Это создает вызов для образовательных учреждений, которые должны адаптировать свои программы, чтобы подготовить специалистов, способных эффективно функционировать в новых условиях.

Таким образом, автоматизация и роботизация в производственном процессе представляют собой важные инструменты, способные повысить эффективность и устойчивость индустрии. Они не только способствуют снижению затрат на рабочую силу и уменьшению числа ошибок, но и позволяют предприятиям быстрее адаптироваться к изменениям в спросе и условиям рынка. Внедрение этих технологий также открывает новые возможности для инноваций, позволяя компаниям разрабатывать более сложные и качественные продукты, что, в свою очередь, способствует их конкурентоспособности и долгосрочному росту. Однако для успешной интеграции этих технологий необходимо учитывать вызовы, связанные с изменением структуры рынка труда. Важно, чтобы компании и государственные органы работали совместно над созданием условий для успешного внедрения автоматизации, включая программы переподготовки и повышения квалификации работников.

Заключение

Автоматизация и роботизация являются ключевыми факторами, способствующими повышению эффективности, снижению затрат и улучшению качества в различных отраслях. Современные технологии не только оптимизируют производственные процессы и улучшают управление ресурсами, но и открывают новые возможности для инноваций и адаптации к быстро меняющимся требованиям рынка. В результате, компании, внедряющие автоматизацию, получают конкурентные преимущества и могут лучше удовлетворять потребности клиентов.

В работе показаны этапы автоматизации производственного процесса и ключевые элементы, входящие в них. Особое внимание уделено изменению структуры рынка труда в результате автоматизации, и необходимости переобучения работников. Показана важность интеграции автоматизации в производственный процесс для повышения конкурентоспособности и устойчивости предприятий.

Библиографический список

1. Автоматизация производства. URL: https://www.expocentr.ru/ru/articles-of-exhibitions/2016/avtomatizaciya-proizvodstva/ (дата обращения: 11.12.2024).

2. *Сафаров И. М., Ахметзянов Р. Н., Петров А. Ю.* Вызовы и перспективы развития экономики в условиях автоматизации производства // Экономика и управление: проблемы, решения. 2024. Т. 2, № 3 (144). С. 20–25. EDN GKLSTY.

3. Для лучшего будущего; отчет об устойчивом развитии 2023. URL: https://www.evraz.com/upload/iblock/9da/ujj0w72fby1twh7f4tcmx0b4zqnuorfu/EVRAZ_Sustainability_Report_2023_RUS_final.pdf (дата обращения: 11.12.2024).

4. «КАМАЗ» подвел итоги производства за 2021 год. URL: https://kamaz.ru/press/news/kamaz_podvyel_itogi_proizvodstva_za_2021_god/ (дата обращения: 11.12.2024).

5. Роботизация «Камаз»: Задачи и перспективы // CONTROL ENGINEERING РОССИЯ. 2019. № 6 (84). С. 22–23. EDN PRNBFO. URL: https://controlengrussia.com/rynok/robotizacija-kamaza/ (дата обращения: 11.12.2024).

6. Автоматизация производства комплексами повышения эффективности работы оборудования / Р. А. Галямов [и др.] // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2022. Т. 78, № 2. С. 75–79. EDN JEVTUX.

7. Труд и занятость в России. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Trud_2023.pdf (дата обращения: 11.12.2024).

УДК 621.926.2 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-126-133**

А. Е. Шохин*
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Ю. М. Замурагин*
научный сотрудник
**Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН*

О КОЛЕБАНИЯХ ВИБРОПЛАТФОРМЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С МАТЕРИАЛОМ

Рассмотрена динамика виброплатформы с находящимся на ней сыпучим материалом при возбуждении колебаний двумя самосихронизирующимися вибровозбуздителями вблизи одной из резонансных частот. Представлена математическая модель, учитывающая возможные режимы движения с отрывом и без отрыва материала от поверхности виброплатформы. Проанализировано влияние свойств материала и его движения на возбуждаемые колебания виброплатформы и самосинхронизацию вибровозбудителей. Установлено, что учет или пренебрежение отрывом материала от поверхности виброплатформы может приводить к значительным различиям в режимах движения виброплатформы и материала, определяемых при одних и тех же частотах возбуждения.
Ключевые слова: *виброплатформа, вибрационная машина, самосинхронизация, дебалансный вибровозбудитель, взаимодействие с материалом.*

A. E. Shokhin*
PhD, Tech., Senior Research Employee
Yu. M. Zamuragin*
Research Employee
**Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences*

ON OSCILLATIONS OF A VIBRATING PLATFORM INTERACTING WITH A MATERIAL

The dynamics of a vibrating platform with bulk material excited by two self-synchronizing vibration exciters near one of the resonant frequencies is considered. A mathematical model is presented that takes into account possible modes of motion with and without separation of the material from the platform surface. The influence of the material properties and its motion on the platform vibrations and self-synchronization of the vibration exciters is analyzed. It is established that taking into account or neglecting the separation of the material from the vibrating platform surface can lead to significant differences in the modes of the platform and the material motion, determined at the same excitation frequencies.
Keywords: *vibration platform, vibration machine, self-synchronization, unbalance vibration exciter, interaction with material.*

Введение

Одной из проблем, возникающей при создании вибрационных машин (ВМ) с самосинхронизирующимися вибровозбудителями, является обеспечение заданного движения их рабочего органа, которое необходимо для эффективной реализации вибрационного технологического процесса (ВТП) обработки материала [1–3]. Для ее решения обычно проектирование ВМ выполняется на основе моделирования их динамики, в результате которого определяются их конструктивные параметры. При этом существенное значение приобретают вопросы выбора математической модели и ее способности адекватно отражать наиболее значимые особенности динамического поведения системы, обусловленные, например, нелинейностью упруго-диссипативных свойств конструктивных элементов, нелинейным взаимодействием рабочего органа с вибровозбудителями и материалом.

Вопросам моделирования и анализа поведения материалов при воздействии вибрации и динамики вибрационных машин с самосинхронизирующимися вибровозбудителями посвящено множество исследований. Различные практически важные эффекты, возникающие в раз-

ных средах и материалах при воздействии вибрации, такие как виброперемещение, вибросепарация, вибрационная инжекция газа в жидкость и др, и модели для их описания представлены, например, в работах [1, 2, 4]. В [5] представлена общая теория синхронизации динамических систем, а также рассмотрены задачи самосинхронизации дебалансных вибровозбудителей в различных колебательных системах с линейными упругими связями. Вопросы проектирования ВМ с самосинхронизирующимися вибровозбудителями рассматривались в [6]. Влияние нелинейности упругих связей на самосинхронизацию вибровозбудителей исследовалось в [7, 8]. В [9, 10] рассматривались методы обеспечения требуемого синхронного вращения дебалансных вибровозбудителей за счет раздельного управления их электропитанием.

Вместе с тем известно сравнительно мало исследований, в которых учитывается влияние движения обрабатываемого материала на колебания рабочего органа ВМ [6, 11–13]. В большинстве практических расчетов этим влиянием пренебрегают [2], обосновывая существенно меньшей массой материала по сравнению с массой рабочего органа, выбором режимов возбуждения колебаний вдали от резонанса и значительным запасом мощности вибровозбудителей. В ряде случаев оно учитывается в виде сил эквивалентного вязкого трения пропорциональным массе материала [6], не отражающих реальный характер сил взаимодействия с рабочим органом. Применение таких подходов позволяет существенно упростить расчеты, однако приводит к некорректным результатам при увеличении массы материала и интенсивности колебаний, и в особенности при настройке ВМ на более энергоэффективные резонансные рабочие режимы.

В настоящей статье рассматривается ВТП, в котором обрабатываемый материал, находящийся на вибрирующей платформе, может отрываться от ее поверхности. Колебания платформы возбуждаются двумя самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями. Приводится математическая модель динамики виброплатформы, учитывающая возможность отрыва материала от ее поверхности и ударное взаимодействие при последующем контакте (далее – модель с соударением). Проводится анализ колебаний платформы, движения материала, и синхронизации вибровозбудителей в зависимости от частоты возбуждения и свойств материала. Полученные результата сравниваются с результатами, полученными с применением модели, в которой взаимодействие с материалом учитывается силами эквивалентного вязкого трения пропорциональными массе материала, не учитывающей отрывного движения материала (далее – безударная модель).

Математическая модель

Модель виброплатформы (рис. 1) состоит из рабочего органа – платформы, моделируемой телом массой m_0 и моментом инерции J_0 относительно своего центра масс в точке O, закрепленной на неподвижном основании с помощью линейно-упругих элементов с коэффициентами жесткости $c_x, c_y/2$ и демпфирования $b_x, b_y/2$. Платформа может совершать колебания в плоскости Oxy, описываемые перемещениями x и y ее центра масс вдоль соответствующих осей координат и углом поворота φ, отсчитываемым от горизонтальной оси против хода часовой стрелки, относительно ее статического положения равновесия. Для возбуждения колебаний платформы на ней установлены два дебалансных вибровозбудителя, которые вращаются во встречных направлениях, обладают одинаковыми дисбалансами $m_r r$ и приводятся в движение практически одинаковыми асинхронными электродвигателями. Моментные характеристики электродвигателей описываются формулой Клосса $M_j\left(\dot{\varphi}_j\right) = 2\sigma_j M_{cj} / (s_{cj} / s_j + s_j / s_{cj})$, **где** j=1,2 – номер вибровозбудителя, M_{cj} и s_{cj} соответственно критические крутящий момент и скольжение электродвигателя, $s_j = (\omega_{0j} - \sigma_j \dot{\varphi}_j) / \omega_{0j}$, $\omega_{0j} = \omega_e / P$ – синхронная скорость вращения электродвигателя, P – число пар полюсов электродвигателя, $\omega_e = 2\pi f_e$, где f_e – частота питающего напряжения, $\sigma_j = \pm 1$ – коэффициент, учитывающий направление действия крутящего момента ($\sigma_j = +1$ соответствует действию крутящего момента двигателя против хода часовой стрелки).

Находящийся на платформе материал моделируется системой из двух тел: нижнего массой m_{w1}, моделирующего слой материала контактирующий с платформой, и верхнего массой m_{w2}, моделирующего остальные слои материала. Оба тела соединены между собой линейным вязкоупругим элементом с коэффициентами жесткости c_w и демпфирования b_w, отражающими упруго-диссипативные свойства материала при относительном движении его слоев. Движение материала описывается относительно подвижной системы координат $O'x'y'$, связанной с платформой, которая в недеформированном состоянии системы совпадает с системой координат Oxy. Предполагается, что материал может перемещаться относительно платформы только по нормали к ее

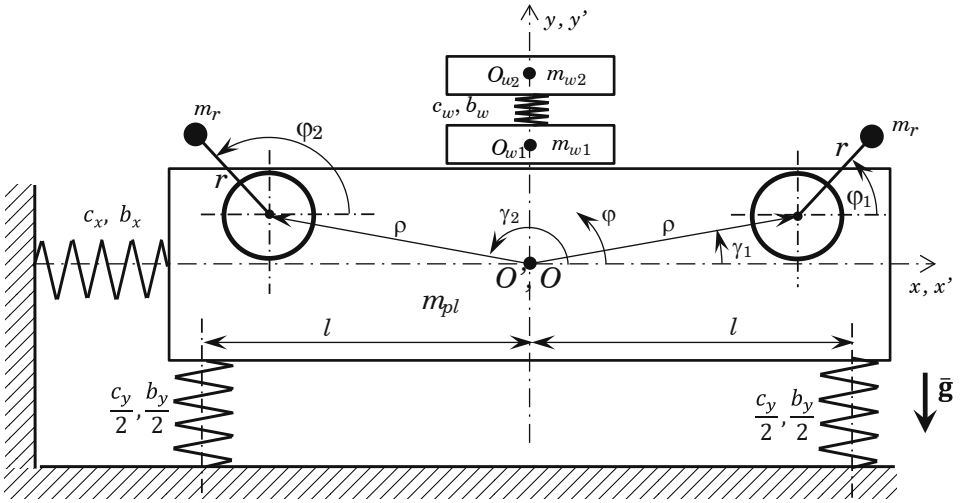


Рис. 1. Модель виброплатформы

поверхности, т. е. вдоль оси *O'y'*, трение между материалом и поверхностью платформы отсутствует. Тогда движение материала относительно платформы описывается смещением y_{w1} центра масс нижнего тела т. O_{w1} относительно исходного положения при контакте с платформой и смещением y_{w2} центра масс верхнего тела т. O_{w2} относительно нижнего тела т. O_{w1}. Рассматриваемая модель системы позволяет учесть как режимы движения без отрыва, так и с отрывом материала от платформы.

Движение системы без отрыва материала от платформы описывается системой уравнений, включающей:

уравнения движения виброплатформы:

$$M\ddot{x} + b_x\dot{x} + c_x x = m_r r\sum_{i=1}^{2}\left(\cos(\varphi_i)\dot{\varphi}_i^2 + \sin(\varphi_i)\ddot{\varphi}_i\right),$$

$$M\ddot{y} + b_y\dot{y} + c_y y =$$

$$= -F_c - mg + m_r r\sum_{i=1}^{2}\left(\sin(\varphi_i)\dot{\varphi}_i^2 - \cos(\varphi_i)\ddot{\varphi}_i\right),$$

$$J\ddot{\varphi} + b_\varphi\dot{\varphi} + c_\varphi\varphi = m_r r\times$$

$$\times\sum_{i=1}^{2}\Big(\left(-1\right)^{i+1}\left(\rho_{1i}(\varphi)\sin(\varphi_i) - \rho_{2i}(\varphi)\cos(\varphi_i)\right)\dot{\varphi}_i^2 - \ldots$$

$$-\left(-1\right)^{i+1}\left(\rho_{1i}(\varphi)\cos(\varphi_i) + \rho_{2i}(\varphi)\sin(\varphi_i)\right)\ddot{\varphi}_i\Big),$$

$$J_e\ddot{\varphi}_i = L_i - m_r r\left(g\cos(\varphi_i) + \ddot{x}\sin(\varphi_i) - \right.$$

$$\left.-\ddot{y}\cos(\varphi_i) - \left(-1\right)^{i+1}\left(\rho_{1i}(\varphi)\sin(\varphi_i) - \ldots\right.\right.$$

$$-\rho_{2i}(\varphi)\cos(\varphi_i)\Big)\dot{\varphi}^2 - \left(-1\right)^{i+1}\times$$

$$\left.\left.\times\left(\rho_{1i}(\varphi)\cos(\varphi_i) + \rho_{2i}(\varphi)\sin(\varphi_i)\right)\ddot{\varphi}\right), \ (i = 1,2), \quad (1)$$

и уравнения движения материала:

$$m_{w1}\left(\ddot{y} + \ddot{y}_{w1}\right) - F_c - b_w\dot{y}_{w2} - c_w y_{w2} + m_{w1}g = 0,$$

$$m_{w2}\left(\ddot{y} + \ddot{y}_{w1} + \ddot{y}_{w2}\right) + b_w\dot{y}_{w2} +$$

$$+c_w y_{w2} + m_{w2}g = 0, \quad (2)$$

где

$$M = m_0 + 2m_r,$$

$$J = J_0 + M\rho_0^2 + 2m_r\rho^2\left(m_0 + 2m_r\cos(2\gamma_1)\right)/M,$$

$$J_e = J_d + m_r r^2, \ L_i = M_i(\dot{\varphi}_i) - M_{Ri},$$

$$\rho_{1i}(\varphi) = \rho_c - \left(-1\right)^{i+1}\mu_1\rho_s\varphi,$$

$$\rho_{2i}(\varphi) = \left(-1\right)^{i+1}\mu_1\rho_s + \rho_c\varphi, \ \mu_1 = m_0/\left(m_0 + 2m_r\right),$$

$$\rho_c = \rho\cos(\gamma_1), \ \rho_s = \rho\sin(\gamma_1),$$

$$\gamma_2 = \pi - \gamma_1, \ m_w = m_{w1} + m_{w2}, \ J_d -$$

момент инерции вала приводного электродвигателя, M_{Ri} – момент сопротивления вращению i-го электровигателя, F_c – нормальная сила контактного взаимодействия между материалом и платформой, определяемая из (1) и (2) при условии $y_{w1} = 0$, $\dot{y}_{w1} = 0$ и $\ddot{y}_{w1} = 0$. Уравнения (1) и (2) получены с учетом малости углов поворота платформы φ на рассматриваемых режимах колебаний.

При движении материала без отрыва от платформы величина силы F_c не должна принимать отрицательных значений. При F_c=0 контакт между материалом и платформой нарушается, и далее режим движения системы зависит от значения F_c в последующий момент времени: если F_c принимает положительные значения, то безотрывный режим движения про-

должается, а если F_c принимает отрицательные значения, то возникает отрыв материала от платформы и начинается его свободный полет. В фазе свободного полета движение материала и платформы описывается также уравнениями (1) и (2) при условии, что F_c=0. Окончание фазы свободного полета определяется из условия столкновения материала с платформой, т. е. $y_{w1} = 0$. В момент столкновения взаимодействие материала с платформой моделируется прямым центральным ударом, в результате которого происходит мгновенное изменение скоростей материала и движущихся элементов виброплатформы, значения которых после удара определяется соотношениями:

$$\begin{aligned}
\dot{y}^+ &= \frac{m_{w1}}{\left(k+m_{w1}\right)}\left(1+R\right)\dot{y}_{w1}^- + \dot{y}^-,\\
\dot{y}_{w1}^+ &= -R\dot{y}_{w1}^-,\\
\dot{y}_{w2}^+ &= \dot{y}_{w2}^- + \left(1+R\right)\dot{y}_{w1}^-,\\
\dot{x}^+ &= -J_e\left(\sin\left(2\varphi_1\right)+\sin\left(2\varphi_2\right)\right)\times\\
&\times m_r^2 r^2 S_y / \left(2k_1\right) + \dot{x}^-,\\
\dot{\varphi}_1^+ &= -m_r r\begin{pmatrix} m_r^2 r^2 \sin\left(\varphi_2\right)\sin\left(\varphi_1-\varphi_2\right)+\\ +MJ_e\cos\left(\varphi_1\right)\end{pmatrix}\times\\
&\times S_y / k_1 + \dot{\varphi}_1^-,\\
\dot{\varphi}_2^+ &= m_r r\begin{pmatrix} m_r^2 r^2 \sin\left(\varphi_1\right)\sin\left(\varphi_1-\varphi_2\right)-\\ -MJ_e\cos\left(\varphi_2\right)\end{pmatrix}\times\\
&\times S_y / k_1 + \dot{\varphi}_2^-,
\end{aligned} \qquad (3)$$

где верхние индексы «–» и «+» обозначают значения скоростей соответственно до и после удара,

$$S_y = \frac{km_{w1}}{k+m_{w1}}\left(1+R\right)\dot{y}_{w1}^-,$$

$$k = \frac{2k_1}{J_e\left(-2+\cos\left(2\varphi_1\right)+\cos\left(2\varphi_2\right)\right)m_r^2 r^2 + 2MJ_e^2},$$

$$k_1 = m_r^4 r^4 \sin\left(\varphi_1-\varphi_2\right)^2 - 2Mm_r^2 r^2 J_e + M^2 J_e^2,$$

R – коэффициент восстановления скорости при ударе. Последующий режим движения системы определяется исходя из найденных после удара значений скорости материала $\dot{y}_{w1}^+$ и контактной силы F_c.

Результаты моделирования и их анализ

При реализации рассматриваемого ВТП обработки материала предполагается, что платформа должна совершать вертикальные колебания, для возбуждения которых требуется однонаправленная вертикальная периодическая сила, возникающая при синхронном вращении вибровозбудителей с разностью фаз $\Delta\varphi=\pi$ (синхронно-противофазное вращение). При этом в рассматриваемой системе вследствие самосинхронизации вибровозбудителей возможно их устойчивое синхронное вращение с разностью фаз отличной от $\Delta\varphi=\pi$, и соответственно, возможно возбуждение форм колебаний платформы отличных от строго вертикальных. Поэтому при моделировании движения системы и анализе результатов основное внимание уделяется диапазонам частот вращения вибровозбудителей, в которых реализуется их синхронно-противофазное вращение.

Моделирование проводилось численно при следующих значениях параметров системы: m_0=12.42 кг, m_r =0.045 кг, J_0=0.11 кг·м^2, J_r=0.8·10^{-3} кг·м^2, m_{w1}=0.75m_w, r=0.09 м, ρ=0,128 м, γ_1=22,5°, γ_2=157,5°, c_x=580 кН/м, c_y=470 кН/м, c_φ=1.8 кН·м/рад, b_x=300 Н·с/м, b_y=40 Н·с/м, b_φ=0.77 Н·с^2/м, g=9.81 м/с^2, M_{c1}=M_{c2}=1.2 Н·м, s_{c1}=s_{c2}=0.15, P=2. Для получения частотных характеристик расчеты проводились при постепенном изменении частоты питания приводных электродвигателей вибровозбудителей с шагом $\Delta f_e = 0.5$ Гц для различных соотношений масс материала и платформы $\mu_w = m_w / M$ и значений коэффициента восстановления R. Для выявления влияния движения материала на возбуждаемые колебания платформы полученные результаты сравнивались с результатами расчетов, полученными с применением безударной модели [6].

На рис. 2, *а* представлены вертикальные колебания платформы $\dot{y}$, на рис 2, *б* – частоты вращения вибровозбудителей $\dot{\varphi}_1$, $\dot{\varphi}_2$, на рис 2, *в* – разности фаз вращения вибровозбудителей $\Delta\varphi$ в зависимости от времени t при отсутствии материала на платформе ($\mu_w = 0$). Из графиков видно, что требуемые режимы синхронного-противофазного вращения вибровозбудителей устанавливаются в диапазоне частот 21–31 Гц – между первой и второй резонансными частотами колебательной системы (межрезонансный диапазон частот), и при частотах больше чем 35,5 Гц – третьей резонансной частоты системы (зарезонансный диапазон частот). В этих диапазонах частот возбуждаются практически однонаправленные вертикальные гармонические колебания платформы. При приближении ко второй резонансной частоте наблюдается увеличение отклонения значений $\Delta\varphi$ от π, обусловленное увеличением воздействия ко-

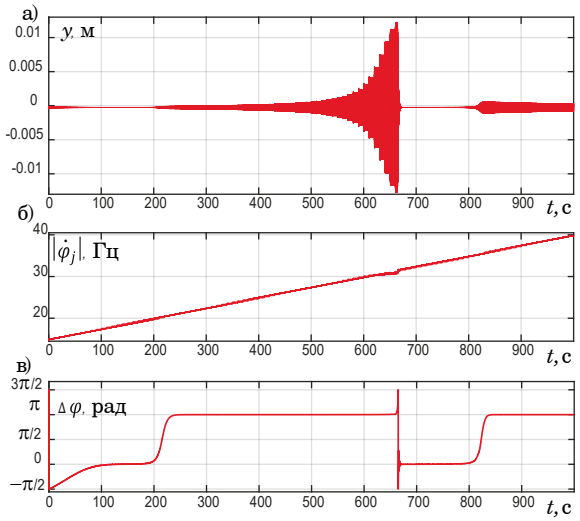


Рис. 2. Результаты моделирования при μ_w=0: *а) вертикальные колебания платформы; б) частота вращения вибровозбудителей; в) разность фаз вращения вибровозбудителей*

лебаний платформы на вращение вибровозбудителей из-за роста амплитуд колебаний и соответственно рассеиваемой энергии в системе. При этом также возбуждаются горизонтальные и угловые колебания платформы. В диапазоне частот 31,5–34,5 Гц – между второй и третьей резонансными частотами – устанавливается синхронно-синфазное вращение вибровозбудителей с $\Delta\varphi \approx 0$, при котором возбуждаются преимущественно горизонтальные и угловые колебания платформы.

На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования колебаний платформы с материалом при $\mu_w = [0.1, 0.2]$ для случая абсолютно неупругого соударения материала с платформой R=0. На рис. 5 и 6 показаны в увеличенном масштабе осциллограммы колебаний платформы и движения материала при $\mu_w = [0, 0.1, 0.2]$ для трех различных характерных режимов возбуждения – в межрезонансном диапазоне частот на удалении при $|\dot{\varphi}_i| = 25.75$ Гц (t=430–440 с) и вблизи при $|\dot{\varphi}_i| = 30.7$ Гц (t=640–650 с) второй резонансной частоты, и в зарезонансном диапазоне частот при $|\dot{\varphi}_i| = 38.75$ Гц (t=950–960 с). Видно, что с увеличением массы материала до $\mu_w = 0.2$ границы диапазонов частот синхронного вращения вибровозбудителей с $\Delta\varphi \approx \pi$ практически не изменяются. В области частот 21–27,5 Гц с увеличением массы материала наблюдается рост амплитуд колебаний платформы, характер колебаний практически не изменяется и остается близким к гармоническому с периодом равным периоду возбуждения (рис. 5, *а*). Движение материала имеет периодический характер с периодом равным периоду возбуждения без отрыва от поверхности платформы в области частот 21–24.5 Гц при $\mu_w = 0.1$ и 21–24 Гц при $\mu_w = 0.2$, и с отрывом от нее в остальных частях указанного выше диапазона частот до 27.5 Гц (рис. 6, *а*).

В остальных рассматриваемых диапазонах частот 27.5–31 Гц и свыше 35,5 Гц с увеличением массы материала амплитуды колебаний платформы уменьшаются (рис. 5.б и 5.в). В диапазоне частот 29,5–31 Гц наблюдается установление хаотичного режима колебаний платформы (рис. 5.б) и материала (рис. 6.б), что, по-видимому, связано с увеличением ампли-

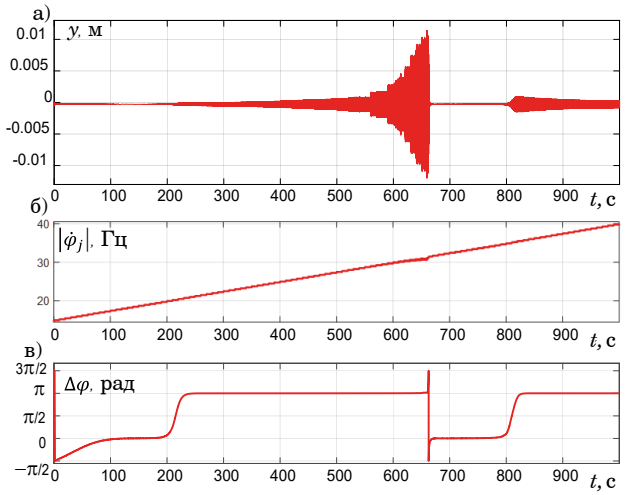


Рис. 3. Результаты моделирования при $\mu_w = 0.1$ *и* R=0: *а) вертикальные колебания платформы, б) частота вращения вибровозбудителей, в) разность фаз вращения вибровозбудителей*

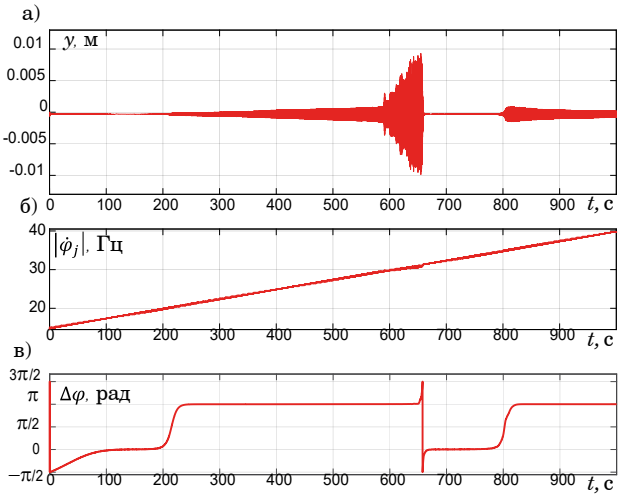


Рис. 4. Результаты моделирования при $\mu_w = 0.2$ *и* R=0: *а) вертикальные колебания платформы, б) частота вращения вибровозбудителей, в) разность фаз вращения вибровозбудителей*

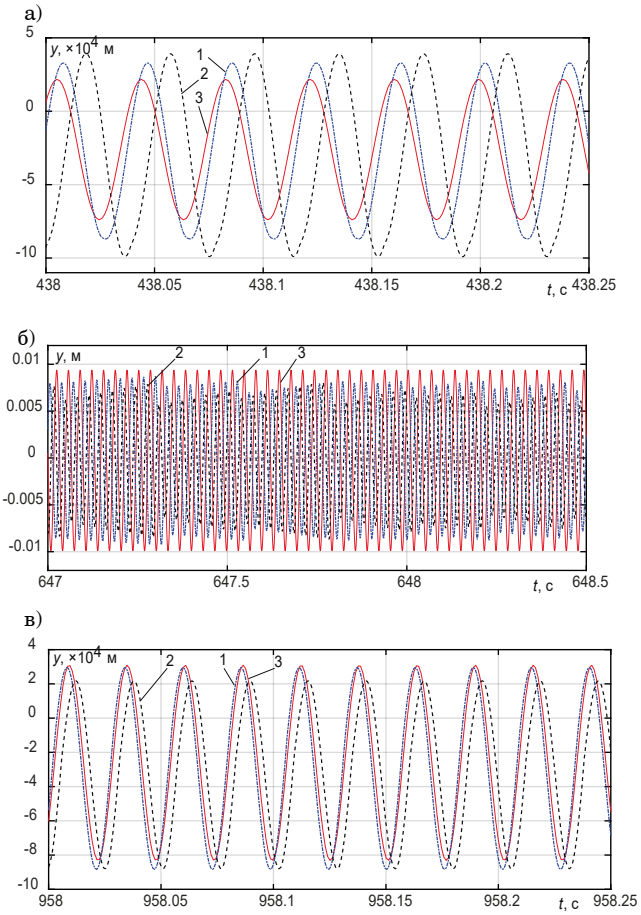


Рис. 5. Вертикальные колебания платформы при R=0: а) при $|\dot{\varphi}_i| = 25.75$ *Гц, б) при* $|\dot{\varphi}_i| = 30.7$ *Гц, в) при* $|\dot{\varphi}_i| = 38.75$ *Гц; 1 –* $\mu_w = 0.1$, *2 –* $\mu_w = 0.2$, *3 –* $\mu_w = 0$

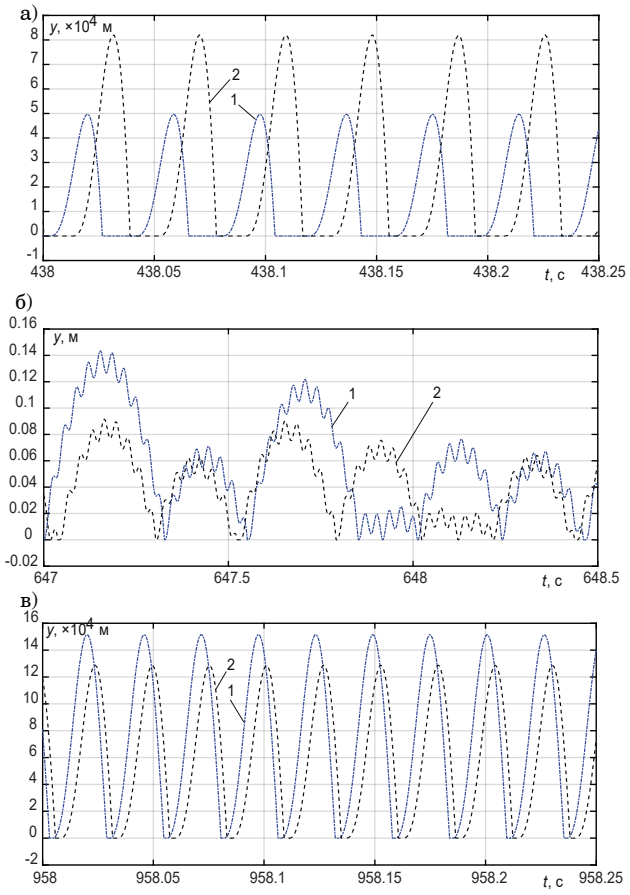


Рис. 6. Перемещение материала относительно платформы при R=0: а) при $|\dot{\varphi}_i| = 25.75$ *Гц, б) при* $|\dot{\varphi}_i| = 30.7$ *Гц, в) при* $|\dot{\varphi}_i| = 38.75$ *Гц; 1 –* $\mu_w = 0.1$, *2 –* $\mu_w = 0.2$

туд подбрасывания материала и длительности фазы его свободного полета, и соответственно ростом интенсивности его соударений с платформой. В зарезонансном режиме по мере удаления от третьей резонансной частоты наблюдается установление периодических близких к гармоническим колебаний платформы (рис. 5.в) и периодических режимов движения материала (рис. 6.в), с одинаковым периодом равным периоду возбуждения.

Анализ результатов моделирования при изменении R в диапазоне значений $[0,0.3]$ показал, что увеличение R не приводит к существенному изменению границ диапазонов частот синхронного вращения вибровозбудителей с $\Delta\varphi \approx \pi$. В области частот 29–31 Гц наблюдается относительно небольшое, в пределах 5%, увеличение амплитуд колебаний платформы, а в зарезонансной области частот наблюдается их уменьшение в пределах 5%. В области частот 21–29 Гц изменение амплитуд колебаний практически не наблюдается. Изменение характера колебаний платформы и движения материала в зависимости от частоты возбуждения практически соответствует, полученному при $R=0$.

На рис. 7 представлены результаты моделирования, полученные с применением безударной модели и модели с ударом при $\mu_w = 0.2$ и возбуждении колебаний в межрезонансном диапазоне частот на удалении от резонансной частоты при $|\dot{\varphi}_j| = 25{,}75$ Гц и $|\dot{\varphi}_j| = 28{,}75$ Гц, и вблизи резонансной частоты при $|\dot{\varphi}_j| = 30{,}7$ Гц, а также в зарезонансном диапазоне частот при $|\dot{\varphi}_j| = 38{,}75$ Гц. Для возможности сопоставления результатов параметры эквивалентного вязкого трения в безударной модели выбирались исходя из равенства среднеквадратичных значений амплитуд вертикальных колебаний платформы, возбуждаемых в сравниваемых моделях на одной и той же частоте вблизи второго резонанса (при $|\dot{\varphi}_j| = 30.9$ Гц). Видно, что при

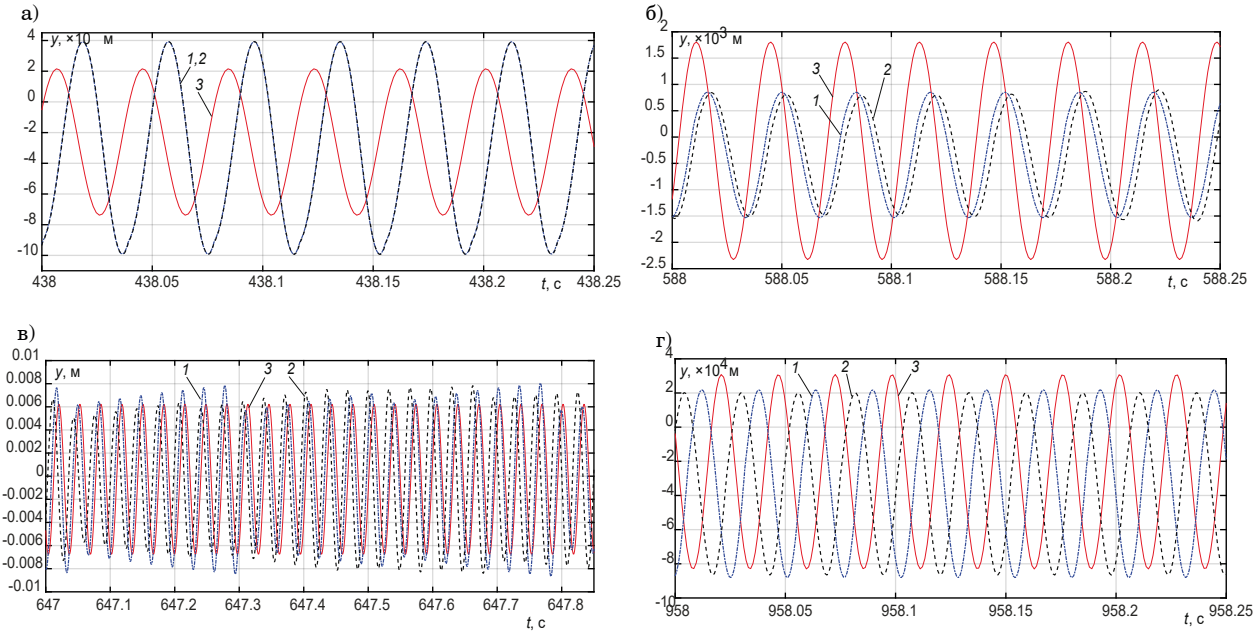


Рис. 7. Вертикальные колебания платформы при $\mu_w = 0.2$*:*
а) при $|\dot{\varphi}_i| = 25.75$ *Гц, б) при* $|\dot{\varphi}_i| = 28.75$ *Гц, в) при* $|\dot{\varphi}_i| = 30.7$ *Гц, г) при* $|\dot{\varphi}_i| = 38.75$ *Гц;*
1 – модель с ударом при R=0, 2 – модель с ударом при R=0.3, 3 – безударная модель

возбуждении колебаний на одних и тех же частотах амплитуды и закон колебаний, определяемые с учетом и без учета соударений платформы с материалом, могут значительно различаться. В межрезонансном зарезонансном диапазонах частот на удалении от резонанса это различие проявляется в значениях амплитуд возбуждаемых колебаний платформы. Причем, в межрезонансном диапазоне имеются две области частот: 21–26 Гц, в которой амплитуды колебаний для модели с ударом A_1 оказываются больше, чем амплитуды колебаний для безударной модели A_3 (рис. 7, *а*), и 26–29 Гц, в которой $A_3 > A_1$ (рис. 7, *б*). В зарезонансном диапазоне частот на удалении от резонанса $A_3 > A_1$ (рис. 7, *г*), причем с увеличением R наблюдается увеличения отношения A_3/A_1. В межрезонансном диапазоне частот вблизи второй резонансной частоты наблюдаются значительные различия как в амплитудах, так и в законе колебаний платформы (рис. 7, *в*).

Выводы

Выполненный анализ показал, что учет или пренебрежение отрывом материала от поверхности виброплатформы в модели ВТП может приводить к значительным различиям в режимах движения виброплатформы и материала, определяемых при одних и тех же частотах возбуждения. Эти различия усиливаются с увеличением массы обрабатываемого материала и интенсивности колебаний и в большей степени проявляются при возбуждении колебаний на околорезонансных частотах. Выявленные особенности динамики виброплатформы, обусловленные взаимодействием с обрабатываемым сыпучим материалом, характерные для многих применяемых на практике ВТП, следует учитывать при исследовании динамики и проектировании вибромашин.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского Научного Фонда, проект №24-19-00333 (https://rscf.ru/project/24-19-00333).

Библиографический список

1. *Блехман И. И.* Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. СПб.: ИД «Руда и металлы», 2013. 640 с.

2. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти томах. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / Под. ред. Э. Э. Лавендела. М.: Машиностроение, 1981. 509 с.

3. *Prikhodko A. A., Gerasimenko E. O.* Study of the efficiency of heat transfer in a stirred tank with nonuniform movement of the impeller // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2023. Т. 57. № 2. С. 215–223.

4. *Нагаев Р. Ф.* Периодические режимы вибрационного перемещения. М.: Наука; Глав. ред. физ.-мат. лит., 1978. 160 с.

5. *Блехман И. И.* Синхронизация динамических систем. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1971. 894 с.

6. *Вайсберг Л. А.* Проектирование и расчет вибрационных грохотов. М.: Недра, 1986. 144 с.

7. *Zhang N.* Self-synchronization characteristics of a class of nonlinear vibration system with asymmetrical hysteresis // Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. 2020. Т. 39. № 1. С. 114–128.

8. *Zhang X., Wen B., Zhao C.* Theoretical study on synchronization of two exciters in a nonlinear vibrating system with multiple resonant types // Nonlinear Dynamics. 2016. Т. 85. №. 1. С. 141–154.

9. *Тягушев С. Ю., Туркин В. Я., Шонин О. Б.* Стабилизация синхронно-противофазного режима вибрационной щековой дробилки средствами автоматизированного электропривода // Обогащение руд. 2011. № 2. С. 38–40.

10. Управление синхронизацией для виброустановки с неидентичными роторами при учете погрешностей измерений / Д. В. Горлатов [и др.] // Информатика и системы управления. 2024. № 4(82). С. 130–143.

11. Influence of load weight on dynamic response of vibrating screen / J. Yong-Zheng [et al.] // Shock and Vibration. 2019. V. 2019. 8 p. https://doi.org/10.1155/2019/4232730.

12. *Нагаев Р. Ф., Карагулов Р. Р.* Динамика вибрационной машины с учетом влияния обрабатываемого материала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2001. № 1. С. 48–51.

13. *Шохин А. Е., Пановко Г. Я., Лян И. П.* Анализ колебаний вибрационной щековой дробилки при взаимодействии с материалом // Обогащение руд. 2021. № 1. С. 25–31.

УДК 681.532.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-134-140**

Д. О. Якимовский*
кандидат технических наук, доцент
Т. Г. Полякова*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ СИЛОВОГО ГИРОСКОПА

Рассмотрены вопросы стабилизации скорости вращения силового гироскопа. Приведены результаты исследования различных алгоритмов управления скоростью силового гироскопа.
Ключевые слова: *силовые гироскопические комплексы, гиромотор, бесконтактные двигатели постоянного тока, разгон ротора.*

D. O. Yakimovsky*
PhD, Tech., Associate Professor
T. G. Polyakova*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SYSTEM FOR STABILIZING THE ROTATION SPEED OF A POWER GYROSCOPE

The issues of stabilizing the rotation speed of a power gyroscope are considered. The results of a study of various algorithms for controlling the speed of a power gyroscope are presented.
Keywords: *power gyroscopic complexes, gyromotor, contactless DC motors, rotor acceleration.*

Силовые гироскопические комплексы (СГК) находят широкое применение в системах управления ориентацией космических аппаратов (КА). Их функционирование основано на принципе изменения направления вектора кинетического момента, запасенного инерционным маховиком. В стандартной конструкции ротор маховика интегрирован с ротором электродвигателя, образуя единый узел, который принято называть гиромотором (ГМ) [1, 2].

В современных силовых гироскопах (СГ), в электроприводах, обеспечивающих вращение маховика, используют бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) с постоянными магнитами (ПМ) на роторе. Гиромоторы, использующие энергию постоянных магнитов, характеризуются низким энергопотреблением и лучшими габаритно-массовыми характеристиками (ГМХ) в сравнении с асинхронными или гистерезисными электроприводами. Ключевым преимуществом БДПТ является их высокая управляемость.

В структуре БДПТ функционально, а в ряде случаев и конструктивно, присутствует датчик положения ротора (ДПР), необходимый для управления токами в фазах статора. Информацию ДПР можно использовать для определения скорости вращения ротора и управления ею. Поскольку номинальное значение скорости вращения ротора СГ при штатной работе не изменяется, или изменяется крайне редко, то задачу стабилизации скорости можно свести к поддержанию постоянства времени поворота ротора на заданный угол. Для снижения статической ошибки контур управления строят на базе ПИ-регуляторов. Структурная схема системы управления скоростью электропривода приведена на рис. 1.

Основными требованиями к системе стабилизации являются обеспечение заданной скорости вращения с заданной погрешностью и минимальная, или ограниченная, пульсация электромагнитного момента БДПТ (или ускорения). Наличие пульсации момента, или другими словами, наличие производной кинетического момента ротора, является возмущающим фактором и может отрицательно сказаться на работе целевой аппаратуры космического аппарата, особенно, если пульсации находятся в области низких частот.

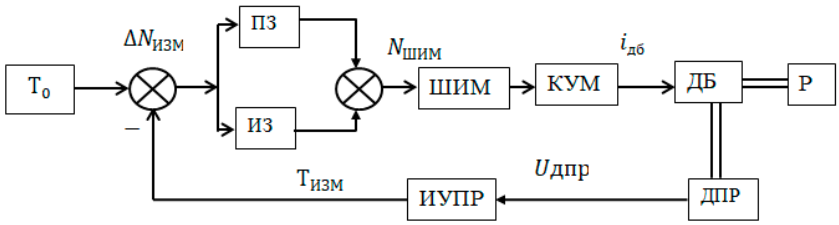


Рис. 1. Структурная схема управления скоростью СГ: T_0 – время заданного угла поворота ротора ГМ; $T_{ИЗМ}$ – измеренное время поворота ротора ГМ на заданный угол; ПЗ– пропорциональное звено; ПИ – интегральное звено; $N_{ШИМ}$ – значение ШИМ-сигнала

От системы стабилизации скорости не требуется высокой динамичности. Нагрузкой для двигателя является момент сопротивления в опорах ротора. Величина этого момента может существенно, в 1,5–2 раза. Причина изменения – действие гироскопического момента, вызванного вращением КА, и изменения температуры. Оба явления плавные и имеют продолжительные переходные процессы от 10 и более секунд. Закон изменения момента сопротивления, принятый при исследованиях и моделировании, приведен на рис. 2.

В случае цифровых систем управления, а современные бортовые привода относятся именно к таким, принципиально невозможно исключить пульсацию момента в пределах одного дискрета сигнала управления $N_{ШИМ}$. Однако можно поставить задачу о проектировании системы управления скоростью, в которой, при штатной нагрузке, изменение сигнала управления не превышало бы одного дискрета.

Стабилизация скорости вращения ротора БДПТ осуществляется путем формирования на фазах статора широтно-модулированного дискретного по времени линейного напряжения. Среднее значение линейного напряжения, подводимого к фазам ДБ, определяется из выражения:

$$U(n) = \frac{U_{ИП} - \Delta U_{БУД}}{T_{ШИМ}} T_+(n),$$

где $U_{ИП} = 48 \pm 2{,}4B(\pm 5\%)$ – напряжение питания блока управления двигателем (БУД), выходное напряжение стабилизированного модуля вторичного питания; $\Delta U_{БУД} \le 1{,}5B$ – падение напряжения в БУД, в цепях протекания тока ДБ; $T_{ШИМ} \le 10^{-4}$ с – период ШИМ; $T_+(n)$ – время включения ШИМ; n – номер такта управления, такт управления $T_n = 0{,}5$ с.

В случае применения классического ПИ- регулятора, без каких-либо ограничений, время включения ШИМ определяется выражениями:

$$\begin{cases} T_+(n) = \dfrac{T_{ШИМ}}{N_{ШИМ}^{MAX}} N_{ШИМ}(n); \\ N_{ШИМ}(n) = k_П * \Delta N_{ИЗМ}(n) + k_И * N_И(n); \\ N_И(n) = N_И(n-1) + \Delta N_{ИЗМ}(n); \\ \Delta N_{ИЗМ}(n) = N_{ИЗМ}(n) - N_0; \end{cases}$$

где $N_{ШИМ}^{MAX} = (2^{Z_{ШИМ}} - 1)$ – максимальное значение ШИМ-сигнала; $Z_{ШИМ}$ – разрядность ШИМ; $N_{ШИМ}(n)$ – текущее значение ШИМ-сигнала на n-м такте управления; $k_П$ – коэффициент усиления пропорционального звена; $k_И$ – коэффициент усиления интегрального

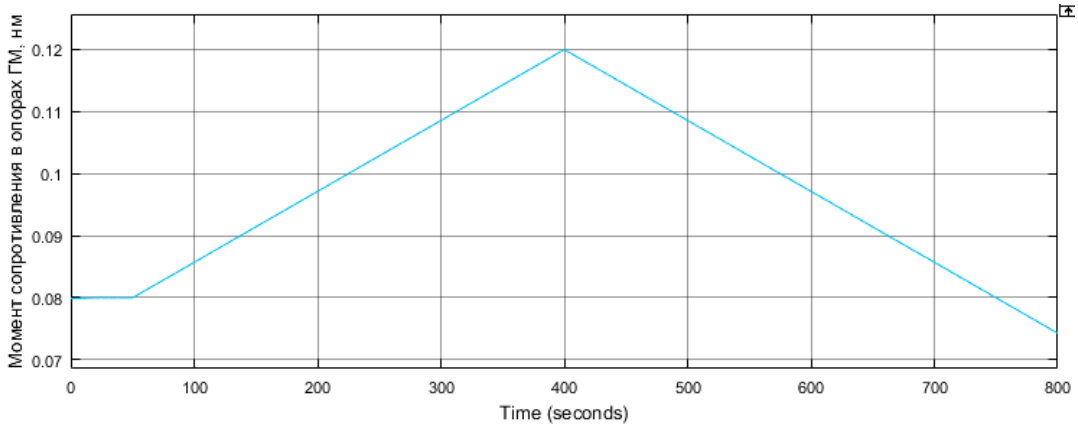


Рис. 2. Изменение момента сопротивления в опорах СГ

звена; T_0, сек – номинальное значение времени 4-х полных оборотов ротора ГМ; $N_{ИЗМ}(n)$ – код (число), соответствующий измеренному времени поворота ротора ГМ на заданный угол; N_0 – код (число), соответствующий номинальному времени 4-х оборотов ротора ГМ; $dT_{ИЗМ}$, сек – дискрет изменения времени.

Результаты моделирования работы системы стабилизации в условиях дрейфа момента сопротивления (рис. 2) приведены на рис. 3.

Следует отметить, что рассмотренный ПИ-регулятор обеспечивает весьма хорошую точность стабилизации скорости вращения. По результатам моделирования отклонение скорости от номинальной не превышает 0,001%.

Ошибка, значение кода, рассогласования заданного времени и измеренного не превышает одного дискрета. Накопленное значение кода интегратора изменяется не более, чем на один дискрет. Однако значение ШИМ $N_{ШИМ}(n)$ изменяется в диапазоне ±2 дискрета. Эпюра динамического момента, соответствующая рассмотренному режиму приведена на рис. 4.

Таким образам, можно сделать вывод, что рассмотренный вариант ПИ-регулятора не обеспечивает минимальную пульсацию динамического момента, причем частота пульсации достаточно низкая, порядка 0,08 Гц.

Рассмотрим вариант ПИ-регулятора, в котором реализовано условие отключения интегрального звена при ошибке рассогласования менее 2 дискрет. Время включения ШИМ в этом случае определяется выражениями:

$$\begin{cases} T_+(n) = \dfrac{T_{ШИМ}}{N_{ШИМ}^{MAX}} N_{ШИМ}(n); \\ N_{ШИМ}(n) = k_П \Delta N_{ИЗМ}(n) + k_И N_И(n); \\ \begin{cases} N_И(n) = N_И(n-1) + \Delta N_{ИЗМ}(n), \\ \text{при_} \Delta N_{ИЗМ}(n) < -D \text{ или } \Delta N_{ИЗМ}(n) > D; \\ N_И(n) = N_И(n-1), \text{при_} -D \le \Delta N_{ИЗМ}(n) \le D; \end{cases} \\ \Delta N_{ИЗМ}(n) = N_{ИЗМ}(n) - N_0; \\ T_0 = \dfrac{8\pi}{\omega_H} = \dfrac{8\pi J}{H_H}; \\ N_0 = \dfrac{T_0}{dT_{ИЗМ}}. \end{cases}$$

где D – параметр (число), определяющее границы отключения интегрального звена.

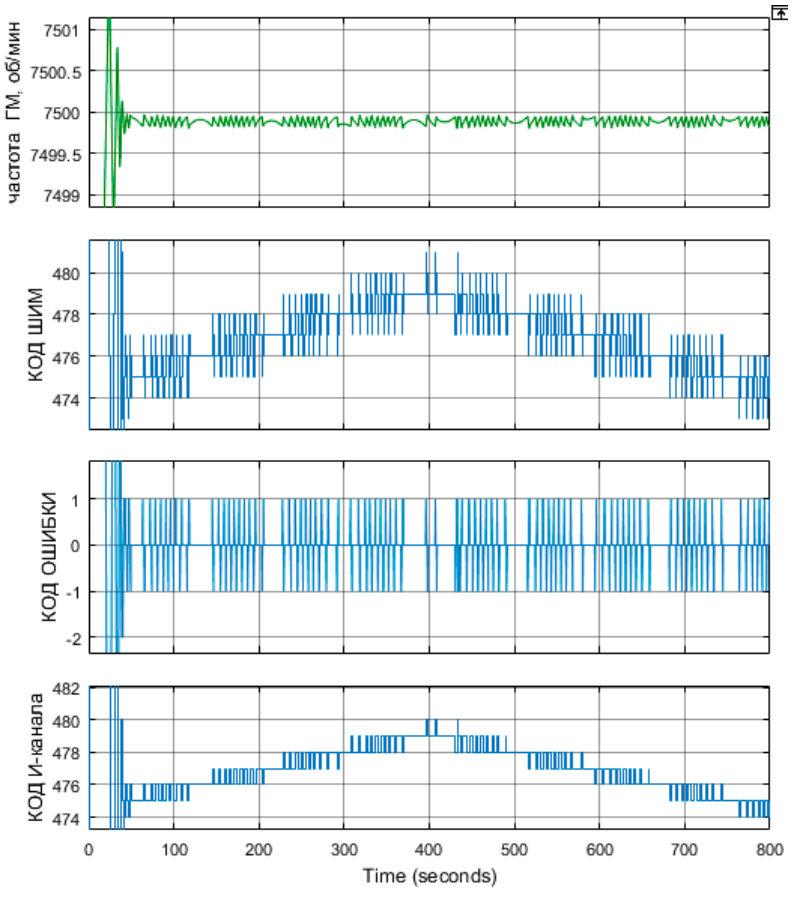


Рис. 3. Результаты моделирования работы системы стабилизации скорости с ПИ-регулятором без ограничений

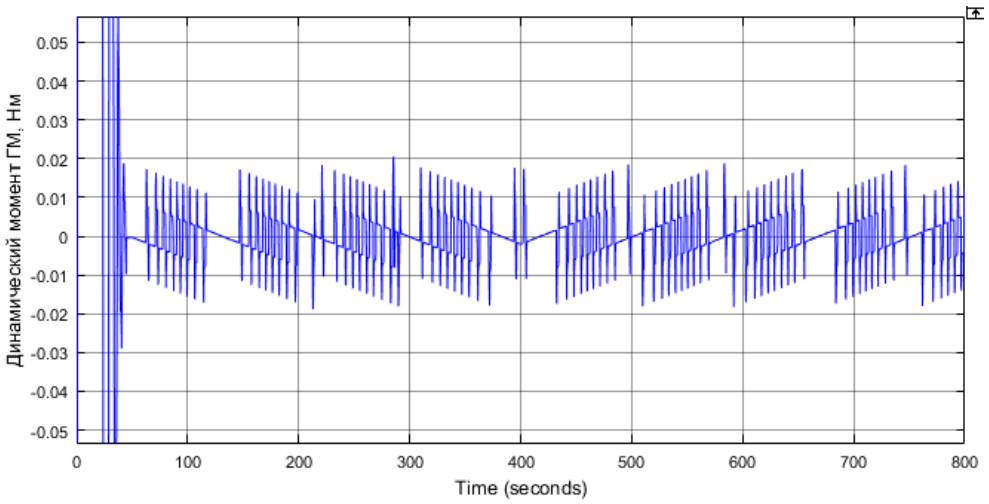


Рис. 4. Динамический момент ротора ГМ

Случай D=1 приведен на рис. 5. Рассмотренный ПИ-регулятор также обеспечивает весьма хорошую точность стабилизации скорости вращения.

Наблюдаются единичные выбросы кода сигнала управления ШИМ до 4 дискрет. Выбросы вызваны накоплением ошибки в процессе дрейфа момента сопротивления и превышения ею

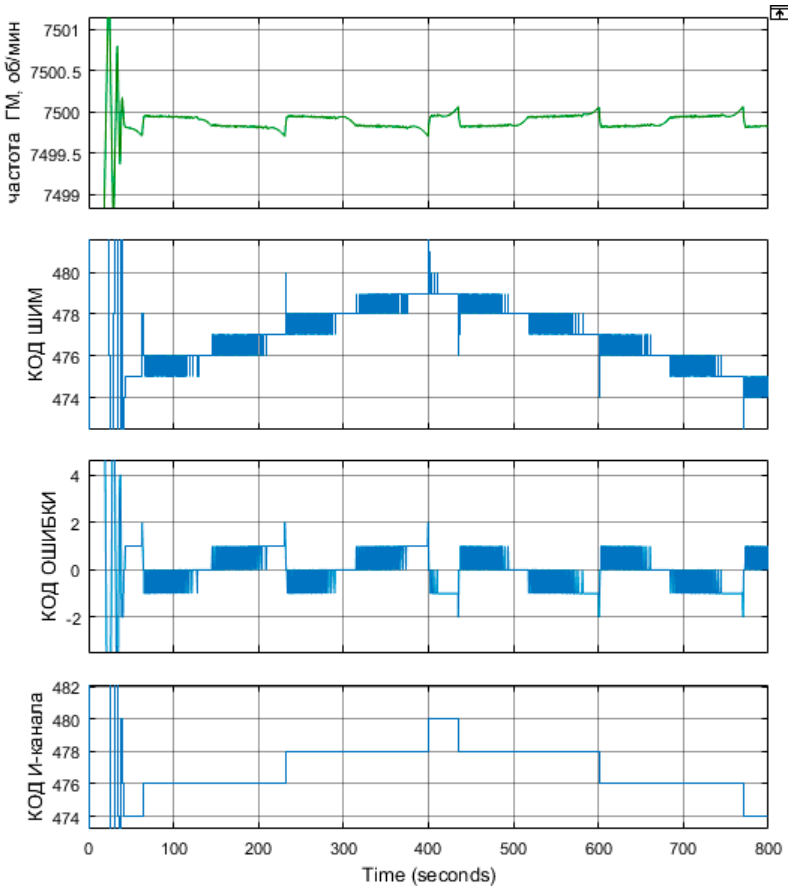


Рис. 5. Результаты моделирования работы системы стабилизации скорости с ПИ-регулятором с отключением ИЗ при D=1

величины параметра D, регулятор выходит из режима отключения интегратора. В результате содержимое интегратора скачком увеличивается на величину ошибки (в данном случае на 2 дискрета), а код сигнала управления ШИМ – на 4 дискрета. Импульс момента ДБ при этом больше в 2 раза, длительность импульса соответствует такту управления.

При увеличении области отключения интегрирующего звена, при увеличении параметра D, единичные выбросы кода сигнала управления ШИМ отсутствуют. В момент синхронизации частоты вращения ротора содержимое интегратора фиксируется на некотором уровне, и далее управление скоростью осуществляется только пропорциональным звеном.

Случай D=6 представлен на рис. 6.

Оптимальное значение параметра можно определить из выражения:

$$D = (1{,}5 - 2)\frac{\Delta M_C}{\Delta M_{ДВ}},$$

где ΔM_C – диапазон изменения момента сопротивления, $\Delta M_{ДВ}$ – приращение момента БДПТ, соответствующее одному дискрету кода ШИМ $N_{ШИМ}(n)$.

В процессе управления значение кода ШИМ изменяется не более, чем на один дискрет, поэтому можно считать, что пульсации момента минимальные. Платой за минимизацию пульсаций является увеличение статической ошибки. Для приведенного примера статическая ошибка увеличилась до 0,0075%. Для некоторых приложений такая величина изменения кинетического момента может быть недопустимой.

Если проанализировать поведение кода ошибки при работе ПИ-регулятора с D=1, можно заметить, что перед изменением ошибки до 2-х дискретов, и соответственно изменением содержимого интегратора, ошибка «долгое время» остается неизменной и равной одному дискрету. Указанное явление можно взять за основу дополнительного условия управления интегратором. Если значение ошибки определенное время остается равным 1, или –1, то содержимое интегратора следует увеличить или уменьшить соответственно. Указанное правило можно реализовать алгоритмом, в котором время включения ШИМ определяется выражениями:

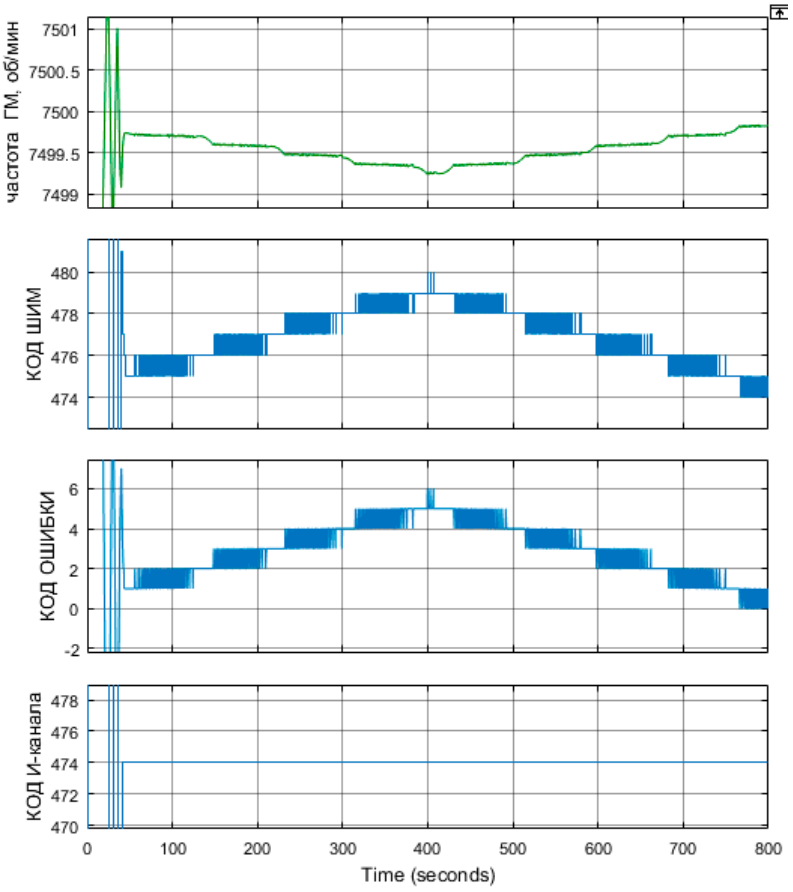


Рис. 6. Результаты моделирования работы системы стабилизации скорости с ПИ-регулятором с отключением ИЗ при D=6

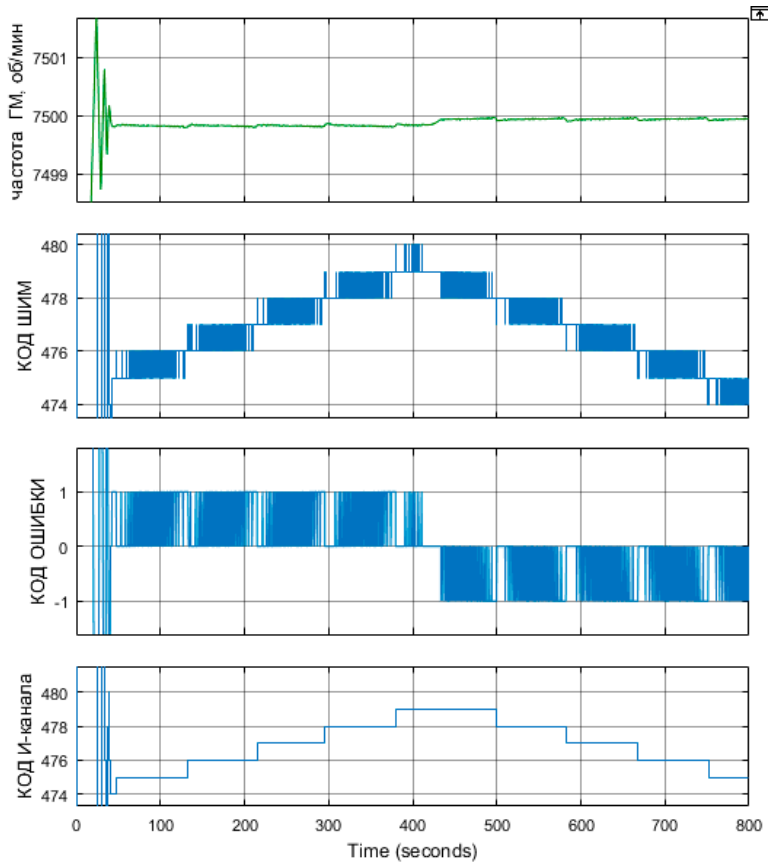


Рис. 7. Результаты моделирования работы системы стабилизации скорости с модифицированным алгоритмом управления интегральным звеном

$$
\begin{cases}
T_{+}(n) = \dfrac{T_{ШИМ}}{N_{ШИМ}^{MAX}} N_{ШИМ}(n); \\
N_{ШИМ}(n) = k_{П}\Delta N_{ИЗМ}(n) + k_{И} N_{И}(n); \\
\begin{cases}
N_{И}(n) = N_{И}(n-1) + \Delta N_{ИЗМ}(n), \\
\text{при_}\Delta N_{ИЗМ}(n) < -1 \text{или} \Delta N_{ИЗМ}(n) > 1;
\end{cases} \\
\begin{cases}
N_{И}(n) = N_{И}(n-1) - 1, \\
\text{при_} -1 \le \Delta N_{ИЗМ}(n) \le 1 \text{и} B(n) \le -B_0;
\end{cases} \\
\begin{cases}
N_{И}(n) = N_{И}(n-1) + 1, \\
\text{при_} -1 \le \Delta N_{ИЗМ}(n) \le 1 \text{и} B(n) \ge B_0;
\end{cases} \\
\begin{cases}
N_{И}(n) = N_{И}(n-1), \\
\text{при_} -1 \le \Delta N_{ИЗМ}(n) \le 1 \text{и} -B_0 < B(n) < B_0;
\end{cases} \\
\Delta N_{ИЗМ}(n) = N_{ИЗМ}(n) - N_0; \\
\begin{cases}
B(n) = B(n-1) + \text{sign}(\Delta N_{ИЗМ}(n)) \cdot 1, \\
\text{при} \left|\Delta N_{ИЗМ}(n)\right| = 1;
\end{cases} \\
\begin{cases}
B(n) = 0, \text{при} \left|\Delta N_{ИЗМ}(n)\right| = 0;
\end{cases} \\
T_0 = \dfrac{8\pi}{\omega_H} = \dfrac{8\pi * J}{H_H}; \\
N_0 = \dfrac{T_0}{dT_{ИЗМ}},
\end{cases}
$$

где $B(n)$ – текущее значение схемы слежения за сигналом ошибки; B_0 – число, определяющее «время постоянства кода ошибки»; *sign* – знак кода ошибки $\Delta N_{ИЗМ}(n)$.

Результаты моделирования работы предложенного алгоритма управления приведены на рис. 7.

Результаты моделирования показали, что стабилизация скорости вращения СГ происходит с минимальными пульсациями момента двигателя, код управления ШИМ изменяется не более, чем на 1 дискрет.

Интегрирующее звено ПИ-регулятора отслеживает дрейф момента нагрузки двигателя – момента сопротивления в опорах ротора. При этом статическая ошибка стабилизации скорости минимальная, соответствующая случаю применению классического ПИ-регулятора (рис. 3).

Заключение

Рассмотрены варианты построения системы стабилизации скорости вращения ротора СГ на основе ПИ-регулятора для электропривода на базе БДПТ.

Показано, что применение классического ПИ-регулятора обеспечивает минимальную статическую погрешность стабилизации скорости, однако регулирование сопровождается низкочастотной пульсацией момента с амплитудой более одного дискрета управления.

Введение в работу ПИ-регулятора отключения интегрирующего звена при достижении величины ошибки определенного значения позволяет минимизировать пульсации момента до величины не более одного дискрета управления, при этом возрастает статическая ошибка стабилизации скорости.

Введение дополнительного алгоритма управления включением интегрального звена, основанного на слежении за текущем значении ошибки, обеспечивает минимальную статическую ошибку и минимальные пульсации момента.

Библиографический список

1. *Сорокин А. В., Ярёменко В. В.* История создания силовых гироскопов для систем управления ориентацией космических аппаратов // Гироскопия и навигация. 2022. Том 30, №1 (116).

2. Современное состояние и перспективы развития силовых гироскопических комплексов / А. Р. Мкртычян [и др.] // Гироскопия и навигация. 2015. № 1(88). С. 93–99.

3. *Коновалов А. С., Якимовский Д. О.* Управление электроприводами космических аппаратов в особых режимах // Информационно-управляющие системы. 2008. № 6(37). С. 26–31.

4. *Якимовский Д. О.* Разгон ротора гироскопа с газодинамическими опорами бесконтактным двигателем постоянного тока без датчика положения ротора // Гироскопия и навигация. 2009. № 3. С. 65–73.

5. *Якимовский Д. О.* Электропривод управляющего двигателя-маховика // Материалы IX Научной сессии. СПб.: ГУАП, 2006. С. 244–246.

6. *Якимовский Д. О., Бураков М. В., Коновалов А. С.* Управление ускорением двигателя-маховика космического аппарата: монография. СПб.: ГУАП, 2018.

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.518 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-141-145**

М. А. Антонов*
студент
А. В. Амплеева*
студент
М. В. Сержантова*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ SCADA-СИСТЕМ

В статье рассмотрены некоторые системы диспетчерского управления и сбора данных (SCADA-системы). Выполнен сравнительный анализ по выделенному критерию для выбора наиболее подходящей для выбранных целей системы и эффективных программно-технических средств управления в производственных процессах. Рассмотрены тенденции развития SCADA-систем.
Ключевые слова: *автоматизация, удаленный доступ, SCADA-системы, автоматические системы управления технологическими процессами, цифровой двойник, имитационная модель.*

M. A. Antonov*
Student
A. V. Ampleyeva*
Student
M. V. Serzhantova*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SCADA SYSTEMS COMPARATIVE ANALYSIS AND DEVELOPMENT TRENDS

The article discusses some dispatch control and data collection systems (SCADA systems). A comparative analysis was performed according to the selected criteria to select the most suitable system for the selected purposes and effective software and hardware controls in production processes. The development trends of SCADA systems are considered.
Keywords: *automation, remote access, SCADA systems, automatic process control systems, digital twin, simulation model.*

Введение

Цифровизация и создание цифровых двойников становятся все более актуальными и востребованными направлениями развития технологий. В России и во всем мире наблюдается активное внедрение цифровых решений в различные сферы деятельности, такие как промышленность, энергетика, транспорт, логистика, образование и здравоохранение.

Цифровые двойники позволяют моделировать и оптимизировать процессы, сокращать издержки, повышать безопасность и качество продукции и услуг. Они также способствуют развитию искусственного интеллекта, машинного обучения и интернета вещей, что открывает новые горизонты для инноваций и экономического роста.

Следующий шаг развития технологий невозможен без уже существующих технологий сбора и обработки данных SCADA, введенных в использование и развивающихся еще с конца прошлого века. На их основе возможно дальнейшее развитие технологий в сторону цифровых двойников. В данной статье будут рассмотрены ключевые архитектуры SCADA и тенденции развития. Будет проведен сравнительный анализ нескольких существующих SCADA-пакетов, как российских, так и зарубежных производителей, для выявления наиболее перспективной системы с точки зрения адаптивности к внедрению новых технологий.

Целью данного исследования является выбор SCADA-системы для создания системы диспетчеризации вентиляционным оборудованием на объекте цифровой энергетики, с возможностью масштабирования, с большим количеством сигналов и возможностью внедрения передовых разработок.

Развитие SCADA-архитектур

С развитием SCADA-технологий, трансформировалось и значение термина SCADA. В русскоязычной литературе можно встретить этот термин как обозначающий программное обеспечение, сделанное по принципам SCADA, так и обозначающий архитектурные особенности.

Архитектура SCADA состоит из аппаратных компонентов и программного обеспечения, где аппаратные компоненты – это «Удаленные конечные устройства (RTU)», «Главный терминал (MTU)», исполнительные механизмы и датчики, а программное компоненты – это «Человеко-машинный интерфейс (HMI)» [1].

SCADA-архитектуры можно разделить на 4 поколения:

– Монолитная,
– Распределенная,
– Сетевая,
– IoT.

Монолитная SCADA-архитектура работает в изолированной среде и не имеет связи с другими системами. Она проектировалась для работы в одиночку, без связи с чем бы то ни было. Примером SCADA-архитектуры первого поколения является сеть, организованная на миникомпьютерах PDP-11. В этой архитектуре RTU обмениваются данными с MTU через глобальные сети (WAN), однако используемые в то время протоколы WAN были полностью отличны от текущих протоколов WAN. Протоколы связи были проприетарные, которые могут использоваться только для подключения RTU с проприетарным MTU от того же производителя [2]. В некоторых случаях, чтобы обеспечить резервирование системы SCADA, вторая полностью идентичная система подключалась к главному устройству.

Распределенные SCADA-архитектуры связаны между собой в ограниченных по расстоянию сетях, таких как локальные сети (LAN (также отличные от современных протоколов)). Это поколение распределяет накладные расходы на вычисления по нескольким системам, подключенным с помощью LAN, что приводит к большей вычислительной мощности, избыточности и надежности для системы. Распределенная архитектура используется в случае нескольких клиентов и станций.

Сетевые SCADA-архитектуры широко используют сети благодаря стандартизации и экономичным решениям для крупномасштабных систем. Их также называют современными SCADA системами [3]. В данном случае системы SCADA могут быть распределены географически. Однако сетевая SCADA тесно связана с распределенной SCADA со значительной разницей, состоящей в переходе к использованию открытых протоколов и стандартов для связи, а не проприетарных протоколов, что приводит к распределению функциональных возможностей MTU по глобальной сети.

IoT SCADA-архитектура – самые современные технологии, чтобы создавать и контролировать системы. Инновации в области Интернета вещей (IoT), доступные облачные вычисления с системами SCADA значительно снизили затраты на инфраструктуру и развертывание. Более того, интеграция и обслуживание также просты по сравнению с предыдущими поколениями. Сбор и контроль всех данных осуществляется с использованием открытого стандарта связи. Собранные данные хранятся в облаке и извлекаются, если необходимо их получить. IoT для промышленности называется IIoT. Следовательно, чтобы внедрить IIoT в SCADA, необходимо интегрировать несколько дополнительных устройств, протоколов в существующую систему. IIoT также повысил свою устойчивость за счет выявления аномального поведения с помощью методов анализа больших данными [4–6].

Большинство современных SCADA-пакетов относятся к клиент-серверным (сетевым или IoT) архитектурам, в которой сервер выполняет основные задачи, такие как подключение к OPC-серверам, опрос контроллеров, чтение и запись значений тегов, выполнение скриптов, работа с базами данных и клиентами. Клиенты же отвечают только за визуализацию данных, запрашивая необходимые данные у сервера.

Сравнительный анализ

Рассмотрим распространенные SCADA-системы:

SCADA-система MasterSCADA (Россия) – программный комплекс для разработки систем диспетчеризации и сбора информации. Его ключевые особенности – модульность, масштабируемость и объектно-ориентированный подход. Система предназначена для сбора, архивирования, визуализации данных, а также управ-

Таблица 1

Сравнение характеристик

SCADA	MasterSCADA	Trace Mode	OpenSCADA	WinCC	КАСКАД
Поддерживаемая ОС	Windows	Windows, Linux	Linux, (+ для клиентов Android)	Windows	Windows, Linux (+ для клиентов iOS и Android)
Поддержка промышленных протоколов	Modbus, Dcon, MasterBUS, MasterLink	Modbus, OPC, SNMP, ROC и другие	Modbus, SNMP, OPC UA, DCON и другие	SIMATIC S7, MPI, PROFIBUS, Modbus TCP/IP, МЭК 60870-5-104	PROFINet, PROFISafe, Modbus, Ethernet/IP, SNMP, BACnet, OPC – OPC UA и др.
Языки программирования	ST, FBD и C#	FBD, SFC, LD, ST, IL	JavaLikeCalc	ANSI C, VBS и VBA	C++ / C#, CONTROL++
База данных	MSSQL, Oracle, Firebird, MySQL, Interbase	MSSQL, Oracle, MySQL, MSAccess, Firebird	DBF, MySQL, SQLite, FireBird, PostgreSQL	Microsoft SQL Server	PostgreSQL, influxDB, Microsoft SQL Server, Oracle и другие
Поддержка IoT	Да	Нет	Да	Нет	Да

ления разнообразными технологическими процессами. Кроме того, система позволяет программировать контроллеры с открытой архитектурой, помимо работы на верхнем уровне.

SCADA-система Trace Mode (Adastra, Россия) работает на операционных системах Windows, Windows CE и Linux. Эта система оптимизирована для работы с контроллерами и поддерживает все современные информационные технологии. Для подключения контроллеров и систем сторонних производителей можно использовать технологию OPC (Open Platform Communications), а для доступа к базам данных – ODBC.

OpenSCADA – это открытая SCADA-система, созданная на основе принципов модульности, мультиплатформенности и масштабируемости. Разработка программы базируется на принципах «open source». Такой подход обусловлен необходимостью создания открытой, надежной и доступной SCADA-системы [7]. Благодаря этому подходу к разработке, тестированию, улучшению, распространению и использованию программы, большое количество разработчиков и энтузиастов могут присоединиться к процессу.

WinCC – это открытая SCADA-система для визуализации процессов, используемая в различных отраслях. Она состоит из модулей и обладает возможностью гибкой настройки, что позволяет применять ее в разнообразных сценариях: от простых однопользовательских приложений в машиностроении до сложных многопользовательских решений и распределенных систем с несколькими серверами и клиентами в промышленных системах.

КАСКАД – это SCADA-система, предназначенная для использования в приложениях, требующих гибкой и адаптируемой платформы для решения специфических задач, а также в крупных и сложных проектах, где предъявляются особые требования к функциональности и архитектуре системы. КАСКАД способен обрабатывать большие объемы данных даже при ограниченных аппаратных ресурсах. Системная архитектура КАСКАДа основана на принципе клиент-сервер, и система разработана с учетом модульного подхода, то есть она состоит из нескольких менеджеров и драйверов (программных компонентов), которые могут быть распределены между разными серверами или компьютерами в сети. Взаимодействие между менеджерами и драйверами происходит через события с использованием протокола TCP/IP.

Характеристики рассмотренных SCADA систем представлены в табл. 1.

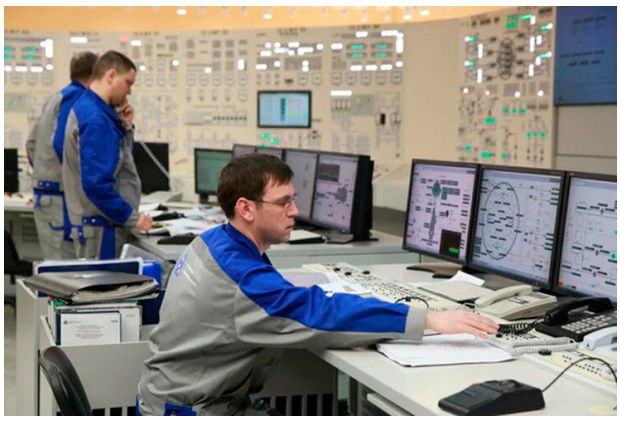


Рис. 1. Рабочее место человека-оператора

Все SCADA-системы предназначены для объединения всего оборудования на предприятии в одну сеть, что позволяет управлять им всем с одного рабочего места. Для этого используется человеко-машинный интерфейс (ЧМИ), обеспечивающий взаимодействие человека-оператора с управляемыми им машинами. На предприятии ЧМИ может быть представлен различными устройствами и системами, такими как панели операторов, сенсорные мониторы, панельные ПК и мобильные устройства [8].

Перспективы развития

На данный момент искусственный интеллект (ИИ) и голосовые помощники стали ключевыми трендами в IT-индустрии в последние годы. Эти технологии активно внедряются в различные сферы деятельности. Большинство крупных компаний уже представили своих голосовых помощников: Алиса, Siri, Google Assistant и другие. Они помогают в повседневных делах, отвечают на вопросы, предоставляют информацию и даже выполняют простые задачи. Благодаря развитию технологий искусственного интеллекта, эти помощники становятся все более совершенными и способными выполнять более сложные запросы пользователей.

Производственный сектор, как правило, отстает от трендов в IT сфере, и активная цифровизация производств идет сравнительно недавно. Поэтому внедрение ИИ помощников на предприятия только начинает набирать обороты.

На момент проведения исследования удалось найти лишь один крупный кейс использования голосового помощника на предприятии. Компания «БСГ», производитель оросительной техники и полного ассортимента запчастей, расширила возможности дистанционного управления и мониторинга дождевальных машин и представила голосовую систему управления техникой на базе речевых технологий SaluteSpeech от SberDevices и нейросетевой модели Сбер GigaChat. Решение представлено на одной из главных выставок агропромышленного комплекса – «Всероссийском дне поля – 2024» [9].

Несмотря на перспективу получения достаточно высокой прибыли в течение 5–10 лет, из-за финансово-экономической нестабильности России отечественные промышленники не готовы ждать столь длительное время, потому инвестируют средства в те сферы, которые позволят выйти на высокий доход в течение 1–2 лет [10, 11].

Другие кейсы интеграции голосового управления носят локальный характер и не выходят за рамки цифровизации конкретного станка или цеха. Однако работа по внедрению технологий началась, и в ближайшем будущем разработка голосовых интерфейсов будет крайне востребована.

Заключение

Среди рассмотренных SCADA-систем наиболее подходящей является КАСКАД, поскольку он разработан для масштабных и сложных проектов, основанных на взаимосвязях элементов с помощью глобальной сети. Так КАСКАД состоит из множества менеджеров, связанных между собой по протоколу TCP/IP и работающих независимо друг от друга, что позволяет легко интегрировать сторонние программы. Возможность работать на любой операционной системе, большое количество нативных поддерживаемых протоколов связи и базы данных нового поколения позволят быстрее адаптироваться к новым технологиям.

Библиографический список

1. The SCADA review: System components, architecture, protocols and future security trends / A. Shahzad [et al.] // American Journal of Applied Sciences. 2014. № 11 (8). P. 1418–1425.

2. R. H. McClanahan The benefits of networked SCADA systems utilizing IP-enabled networks // Rural Electric Power Conference. 2002. P. 1–5.

3. N. H. Pathak. Modern SCADA systems // International engineering journal for research and development. 2014. № 2 (2). P. 1693–1699.

4. A systematic framework to generate invariants for anomaly detection in industrial control systems / C. Feng [et al.] // 26th Annual Network and Distributed System Security Symposium. 2019.

5. X. Lyu. Safety and security risk assessment in cyber-physical systems // IET Cyber-Phys. Syst. 4. 2019. № 221–232 (11).

6. Multiattribute. SCADA-specific intrusion detection system for power networks / Y. Yang [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. 2014. № 29 (3). P. 1092–1102.

7. SCADA consideration / I. Stoian [et al.] // IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR). 2010. № 3. P. 1–6.

8. Человеко-машинный интерфейс. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Человеко-машинный_интерфейс (дата обращения: 28.11.2024).

9. Sber Devices. Всероссийский день поля – 2024. URL: https://sberdevices.ru/press/detail/vserossijskij-den-polya-2024-bsg-predstavila-golosovuyu-sistemu-upravleniya-dozhdevalnymi-mashinami-na-baze-tehnologij-sber-devices/ (дата обращения: 28.11.2024).

10. Московский Фонд поддержки промышленности и предпринимательства. Цифровизация промышленности. URL: https://mfppp.ru/news/promyshlennost/tsifrovizatsiya-promyshlennosti/ (дата обращения: 28.11.2024).

11. Исследование «Особенности и перспективы российского рынка Internet of things». URL: https://pltf.ru/2019/02/21/issledovanie-br-osobennosti-i-perspektivy-rossijskogo-rynka-br-internet-of-things/ (дата обращения: 28.11.2024).

УДК 681.51 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-146-149**

Н. Л. Гречкин*
старший преподаватель
Е. Ю. Ватаева*
кандидат технических наук, доцент
В. Ф. Шишлаков*
доктор технических наук, профессор
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ТОЧЕК ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ЭЛЕМЕНТА «ЗОНА НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ»

Современные системы автоматического управления характеризуются высокой степенью сложности, например, многомерность, неопределенность математической модели, нестационарность, нелинейность и др. Синтез законов управления для таких систем часто связан со значительными трудностями теоретического и вычислительного характера. Следовательно, разработка программного комплекса, позволяющего синтезировать высококачественные и надежные системы автоматического управления техническими объектами и устройствами при наличии нелинейных статических и динамических характеристик, имеет особую актуальность. В работе предложен алгоритм модуля для определения точек переключения некоторых неоднозначных нелинейных характеристик, являющегося частью программного комплекса, реализующего задачу синтеза операторов управления нелинейных систем автоматического управления.
Ключевые слова: *точки переключения, обобщенный метод Галеркина, нелинейные системы автоматического управления, зона нечувствительности.*

N. L. Grechkin*
Senior lecturer
E. Yu. Vataeva*
PhD, Tech., Associate Professor
V. F. Shishlakov*
Dr. Sc., Tech., Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ALGORITHM FOR CALCULATING SWITCHING POINTS OF A NONLINEAR ELEMENT “DEAD ZONE"

The paper discusses an algorithm for determining the switching points required when solving the problem of synthesizing controllers for various automatic control systems based on a modification of one of the methods of mathematical physics – the generalized Galerkin method, and some ambiguous nonlinear characteristics. The results of applying the algorithm are given.
Keywords: *switching points, generalized Galerkin method, nonlinear automatic control systems, dead zone.*

Современные программные пакеты предоставляют широкий спектр инструментов для разработки, проектирования и синтеза систем автоматического управления (САУ). Их применение при построении систем (законов управления) предполагает алгоритмизацию одного из методов синтеза. В работе рассматривается обобщенный метод Галеркина как один из таких методов. Также анализируется часть программного комплекса, который реализует синтез нелинейных САУ, в частности, алгоритм расчета точек переключения нелинейного элемента «зона нечувствительности» [1–6].

Вид характеристики «зона нечувствительности» представлен на рис. 1. Математическое описание нелинейной характеристики можно представить в виде следующей системы:

$$x_{вых} = \begin{cases} k \cdot (x_{вх} - b), & \text{при} \quad x_{вх} \geq b \\ 0, & \text{при} \quad |x_{вх}| < b \\ k \cdot (x_{вх} + b), & \text{при} \quad x_{вх} \leq -b \end{cases}.$$

Постановка задачи синтеза и общая схема ее решения обобщенным методом Галеркина были подробно рассмотрены в [7–9]. Следует напомнить лишь то, что решение задачи синтеза не-

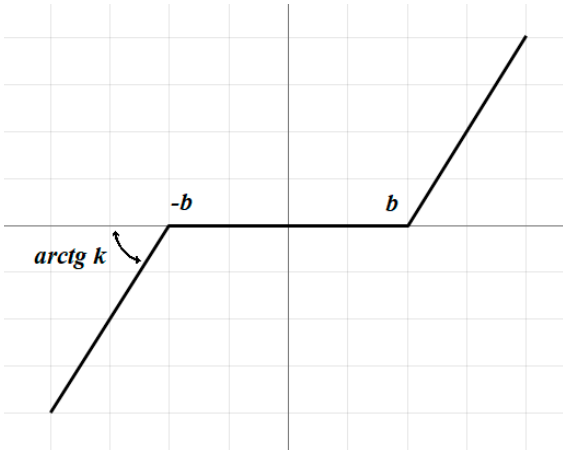


Рис. 1. Вид нелинейной характеристики «зона нечувствительности»

линейной импульсной системы сводится в математическом плане к поиску оптимума целевой функции вида:

$$J = \sum_{q=1}^{m}\left\{\sum_{i=0}^{n} a_i(c_k)A_{qi} + \sum_{i=0}^{n^*} a_i^*(c_k)A_{qi}^* + \right.$$

$$+\sum_{i=0}^{u} b_i(c_k)B_{qi} + \sum_{i=0}^{u^*} b_i^*(c_k)B_{qi}^* + \sum_{i=0}^{v} e_i(c_k)C_{qi} +$$

$$\left. + \sum_{i=0}^{v^*} e_i^*(c_k)C_{qi}^*\right\}^2, \min_{c_k} J \to 0,$$

где $A_{qi} = \int_0^\infty D^i\left\{x^0(t)\right\}e^{-\rho_q t}dt, \quad i = 1,2,\ldots,n;$

$$A_{qi}^* = \int_0^\infty D^i\left\{x^{0*}(t)\right\}e^{-\rho_q t}dt, \quad i = 1,2,\ldots,n^*;$$

$$B_{qi} = \int_0^\infty D^i\left\{F\left[x^0(t), \dot{x}^0(t)\right]\right\}e^{-\rho_q t}dt = B_q\rho^{i-1},$$

$$i = 1,2,\ldots,u;$$

$$B_{qi}^* = \int_0^\infty D^i\left\{F\left[x^{0*}(t), \dot{x}^{0*}(t)\right]\right\}e^{-\rho_q t}dt = B_q^*\rho^{i-1},$$

$$i = 1,2,\ldots,u^*;$$

$$C_{qi} = \int_0^\infty D^i\left\{H1(t)\right\}e^{-\rho_q t}dt, \quad i = 1,2,\ldots,v;$$

$$C_{qi}^* = \int_0^\infty D^i\left\{f1^*(t)\right\}e^{-\rho_q t}dt, \quad i = 1,2,\ldots,v^*.$$

Для вычисления интеграла B_{qi} нелинейная функция $F[x^0(t)]$ представляется в виде обобщенной функции:

$$F\left[x^0(t)\right] = F_{+0}(t)\cdot 1(t) +$$

$$+\sum_{j=0}^{r}\left[F_{+j}(t) - F_{-j}(t)\right]\cdot 1\left(t - t_j\right),$$

где t_j – моменты переключения нелинейности; $F_{+j}(t)$ и $F_{-j}(t)$ – аналитические выражения нелинейной функции соответственно до и после момента переключения t_j; $F_{+0}(t) = F_{-1}(t)$ – аналитические выражения нелинейной функции в момент времени $t = +0$; r – число переключений нелинейной функции, зависящее от вида характеристики нелинейного элемента $F(x)$ и желаемого программного движения $x^0(t)$.

В случае непрерывной нелинейной системы импульсный элемент отсутствует, а значит целевая функция примет вид:

$$J = \sum_{q=1}^{m}\left\{\sum_{i=0}^{n} a_i(c_k)\cdot A_{qi} + \sum_{i=0}^{u} b_i(c_k)\cdot B_{qi} + \right.$$

$$\left. + \sum_{i=0}^{v} e_i(c_k)\cdot C_{qi}\right\}^2, \ \min_{c_k} J \to 0.$$

Таким образом, вычисление точек переключения является одним из этапов вычисления интегралов Галеркина для синтеза САУ.

Программа, реализующая обобщеный метод Галеркина, посстроена по блочно-модульному принципу [10]. Алгоритм модуля, определяющий моменты переключения t_j, представлен на рис. 2.

Исходными данными для работы программы являются:

– переменная t, хранящая в себе массив временных данных от 0 до $T_{ПП}$ с заданным шагом Δt;

– переменная y – функция от t, содержащая в себе массив данных с учетом параметров желаемого программного движения;

– параметры b и k нелинейности «зона нечувствительности» (рис. 1).

Алгоритм работы программы заключается в следующем:

1. В начале работы, когда введены исходные данные, определяется переменная i, равная 1, и i_1, равная количеству элеменов массива y.

2. Проверяется условие $(i_1+1) > i$. Если оно выполняется, то осуществялется переход к пункту 3, если не выполняется – к пункту 8.

3. Проверяется условие $y(1,i) \geq b$. Если оно выполняется, то осуществляется переход к пункту 4, если не выполняется – к пункту 5.

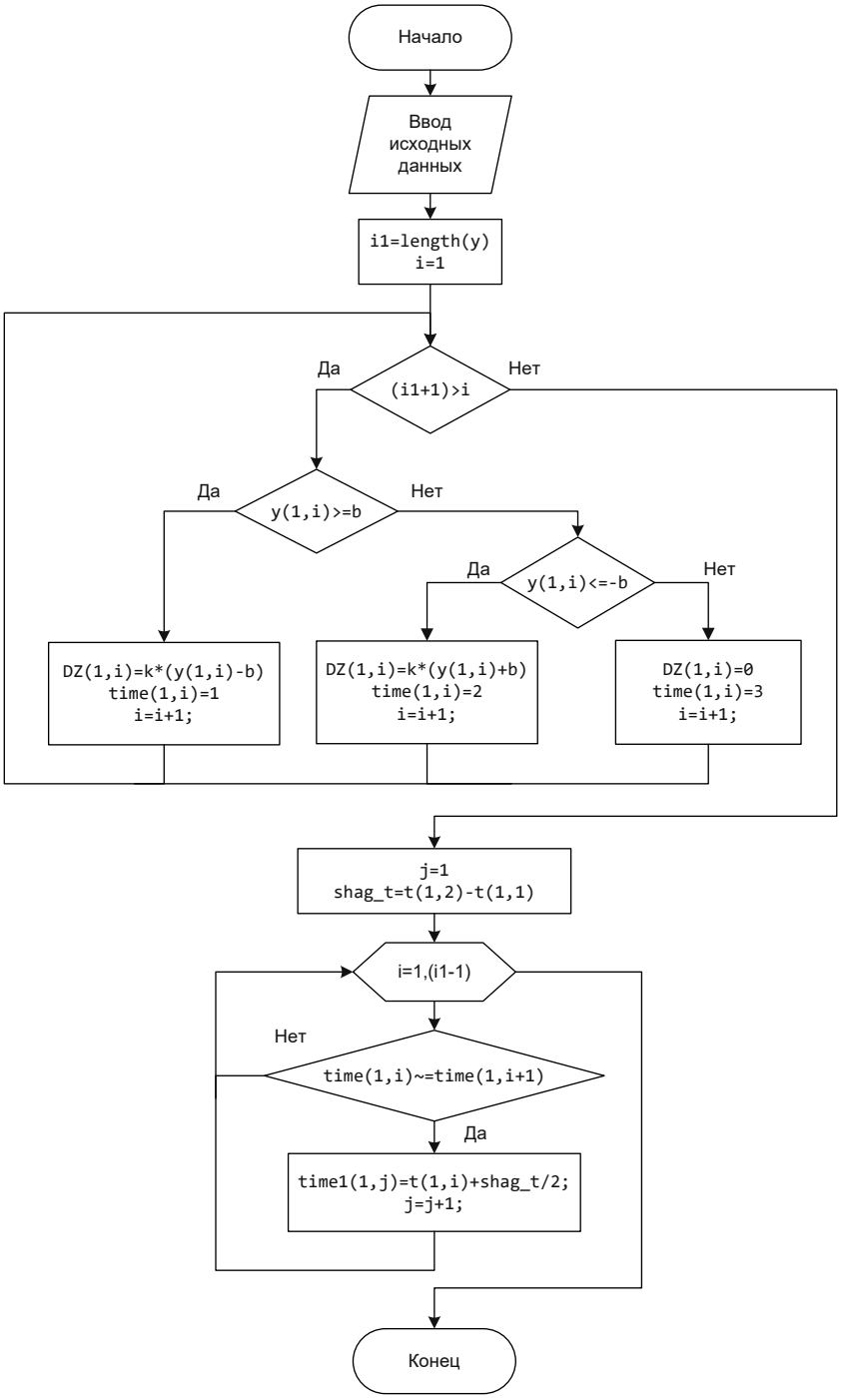


Рис. 2. Схема алгоритма определения точек переключения для нелинейности «зона нечувствительности»

4. В переменную *DZ* записывается числовое значение, равное $k\cdot(y(1,i)-b)$, в первую строку i-го столбца, в переменную *time* записывается числовое значение 1 в первую строку i-го столбца, значение i увеличивается на единицу, после выполняется переход к пункту 2.

5. Проверяется условие $y(1,i) \le -b$. Если оно выполняется, то осуществляется переход к пункту 6, если не выполняется – к пункту 7.

6. В переменную *DZ* записывается числовое значение, равное $k\cdot(y(1,i)+b)$, в первую строку i-го столбца, в переменную *time* записывается числовое значение 2 в первую строку i-го столбца, значение i увеличивается на единицу, после выполняется переход к пункту 2.

7. В переменную *DZ* записывается числовое значение 0 в первую строку i-го столбца, в переменную *time* записывается числовое значение 2

в первую строку i-го столбца, значение i увеличивается на единицу, после выполняется переход к пункту 2.

8. Переменной j присвается значение 1. Вычисляется шаг Δt.

9. Значение переменной i изменяется от 1 до $i1\text{-}1$ на каждой итерации с шагом 1. Как только переменная i будет равна $i1\text{-}1$, выполняется переход к пункту 12.

10. Проверяется условие $time(1,i) \neq time(1,i+1)$. Если оно выполняется, переход к пункту 11. Если условие не выполняется, переход к пункту 9.

11. В переменную *time1*, которая является матрицей, записывается значение первой строки i-го столбца матрицы *time*, увеличенное на половину шага Δt.

12. После окончания работы программы выводятся матрицы *DZ* и *time1*. С помощью матрицы *DZ* может быть построен желаемый переходный процесс, который прошел через нелинейность «зона нечувствительности». Матрица *time1* содержит в себе массив моментов переключения нелинейного звена.

Вычисленные точки переключения передаются в основную часть программы для расчета целевой функции.Таким образом, в работе продемонстрирован алгоритм модуля, позволяющего вычислять точки переключения нелинейного элемента, входщяго в состав САУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Библиографический список

1. Синтез адаптивного наблюдателя для нелинейных нестационарных систем / Х. Т. Нгуен [и др.] // Научнотехнический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 4. С. 554–562. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-554-562.

2. Output Controller for Uncertain Nonlinear Systems with Structural, Parametric, and Signal Disturbances / A. Pyrkin [et al.] // IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 2012. DOI: 10.1109/CCA.2012.6402352.

3. *Furtat I. B., Gushchin P. A., Nguyen B. H.* Nonlinear control providing the plant inputs and outputs in given sets // European Journal of Control. 2024. Т. 76. С. 100944.

4. Analysis and Synthesis of Nonlinear Control Systems: A Convex Optimisation Approach / M. Bernal [et al.]. 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-90773-0.

5. *Hassan K.* Khalil. Nonlinear Systems. USA, 2013, 560 p.

6. *Shankar S.* Nonlinear Systems. Analysis, Stability, and Control. USA, Berkeley Publ., 1999, 675 p.

7. *Никитин А. В., Шишлаков В. Ф.* Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: монография / Под. ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2003.

8. *Ватаева Е. Ю.* Параметрический синтез маломощной потенциометрической следящей системы // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=178477 (дата обращения: 16.12.2024).

9. Synthesis of control laws of electromechanical systems under polynomial approximation of characteristics of nonlinear elements / V. Shishlakov [et al.] // 13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings». 2018. Vol. 161 (2). P. 02006. DOI: 10.1051/matecconf/201816102006.

10. *Гречкин Н. Л., Ватаева Е. Ю., Шишлаков В. Ф.* Алгоритм вычисления точек переключения нелинейности «двухпозиционное реле с гистерезисом» // Радиотехника. 2024. Т. 88. № 8. С. 26–34. DOI: https://doi.org/10.18127/j00338486-202408-03.

УДК 681.51 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-150-152**

Н. Л. Гречкин*
старший преподаватель
Е. Ю. Ватаева*
кандидат технических наук, доцент
Д. В. Шишлаков*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ВЫЧИСЛЕНИЕ ТОЧЕК ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ЭЛЕМЕНТА «ЗОНА НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ»

В работе продемонстрирована работоспособность алгоритма модуля для определения точек переключения некоторых неоднозначных нелинейных характеристик, а именно «зона нечувствительности», являющегося частью программного комплекса, реализующего задачу синтеза операторов управления нелинейных систем автоматического управления.
Ключевые слова: *точки переключения, обобщенный метод Галеркина, нелинейные системы автоматического управления, зона нечувствительности.*

N. L. Grechkin*
Senior Lecturer
E. Yu. Vataeva*
PhD, Tech., Associate Professor
D. V. Shishlakov*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

CALCULATION OF SWITCHING POINTS OF A NONLINEAR ELEMENT «DEAD ZONE»

The paper demonstrates the operability of the algorithm of the module for determining the switching points of some ambiguous nonlinear characteristics, namely the "dead zone", which is part of the software package that implements the task of synthesizing control operators for nonlinear ACS.
Keywords: *switching points, generalized Galerkin method, nonlinear automatic control systems, dead zone.*

Одним из важных аспектом теории управления являются системы автоматического управления (САУ) с нелинейностью типа «мертвая зона» (или «зона нечувствительности»). Эти системы отличаются тем, что в определенном диапазоне входных сигналов выходная реакция остается неизменной. Это может быть полезно для устранения нежелательных колебаний, снижения чувствительности к небольшим изменениям входных сигналов и минимизации реакции на шумы. Однако такая характеристика делает систему нелинейной, что часто приводит к сложностям в проектировании, особенно при синтезе параметров регулятора. Кроме того, наличие данной нелинейности может приводить к возникновению устойчивых автоколебаний в системе.

Современные программные пакеты предлагают широкий спектр инструментов для разработки, проектирования и синтеза систем автоматического управления. Их использование в построении систем управления предполагает алгоритмизацию одного из методов синтеза. В данной работе рассматривается обобщенный метод Галеркина как один из таких методов. Также анализируется часть программного комплекса, реализующего синтез нелинейных систем автоматического управления, в частности, алгоритм расчета точек переключения нелинейного элемента «зона нечувствительности» [1–6].

В [7] приводится алгоритм вычисления точек переключения нелинейности «зона нечувствительности», рассмотрим его работоспособность на следующих примерах.

Предположим, что есть заданное программное движение, представленное на рис. 1. Это

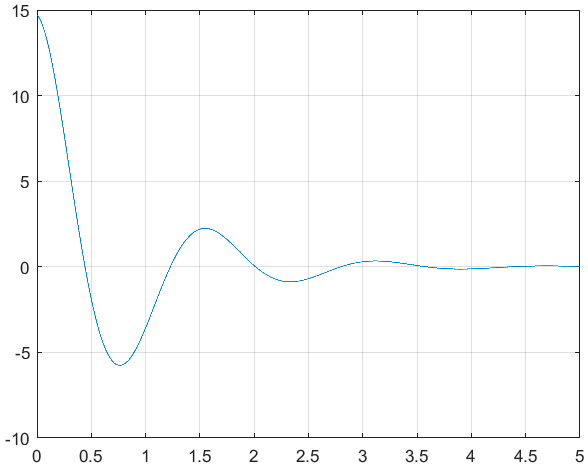


Рис. 1. Графическое представление заданного программного движения

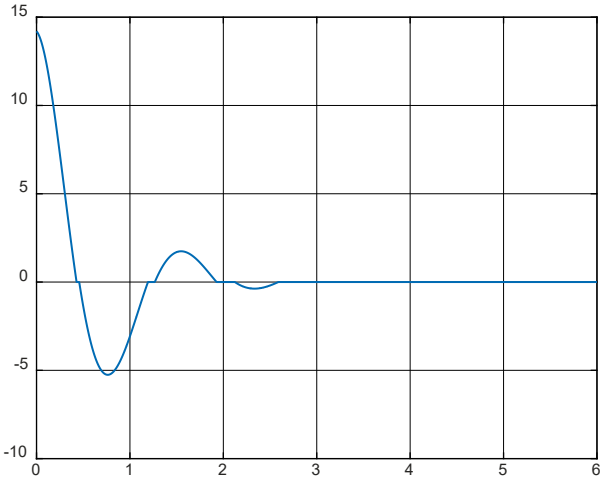


Рис. 3. Графическое представление заданного программного движения при прохождении через нелинейность «зона нечувствительности»

движение описывается следующим уравнением:

$$x^0(t) = \left[15 \cdot e^{-1.2 \cdot t} \cdot \cos\left(4 \cdot t - 0.2\right)\right] \cdot 1(t).$$

Нелинейность «зона нечувствительности» с параметрами b=0.5 и k=1 представлена на рис. 2.

Используя алгоритм [7], определяем, что точек переключения будет семь. Их значения: t_1= 0.4288 с., t_2 = 0.4571 с., t_3 = 1.1931 с., t_4 = 1.2663 с., t_5 = 1.9276 с., t_6 = 2.1236 с., t_7 = 2.5888 с. При прохождении через нелинейность желаемое программное движение примет вид, представленный на рис. 3.

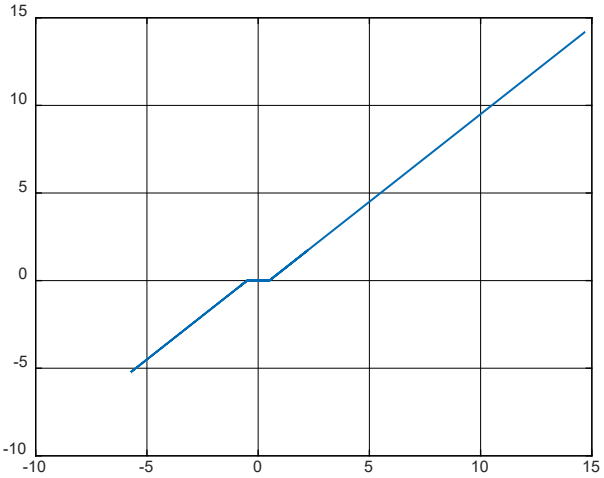


Рис. 2. Графическое представление «зона нечувствительности» с параметрами b=0.5 и k=1

Временные значения из рис. 3 совпадают с полученными с помощью алгоритма точками, что говорит о работоспособности алгоритма.

В случае импульсного процесса на входе нелинейности (рис. 4) с периодом T = 0.1 с., то на выходе нелинейности процесс примет вид, представленный на рис. 5. Выражение программного движения в этом случае примет вид:

$$x^{0*}(t) = \left[15 \cdot e^{-1.2nT} \cdot \cos\left(4nT - 0{,}2\right)\right] \cdot \delta\left(t - nT\right)$$

В случае с импульсными характеристиками моменты переключений будут определяться несколько иначе, а именно:

$$t_j^* = E\left(\frac{t_j}{T}\right) \cdot T,$$

где t_j – определенные ранее точки переключения, T – период работы импульсного элемента, E – целая часть числа.

Используя формулу, получим следующие точки переключения: t_1 = 0.4 с., t_2 = 0.5 с., t_3 = =1.2 с., t_4 = 1.3 с., t_5 = 1.9 с., t_6 = 2.1 с, t_7 = 2.6 с. Как видно из рис.5, временные значения совпадают со значениями, полученными по формуле, а значит все расчеты выполнены верно.

Таким образом, в работе продемонстрирована рабоспособность алгоритма, позволяющего вычислять точки переключения нелинейного элемента, входщяго в состав САУ. В качестве примера была расмотрена нелинейность типа «зона нечувствительности» в составе нелиней-

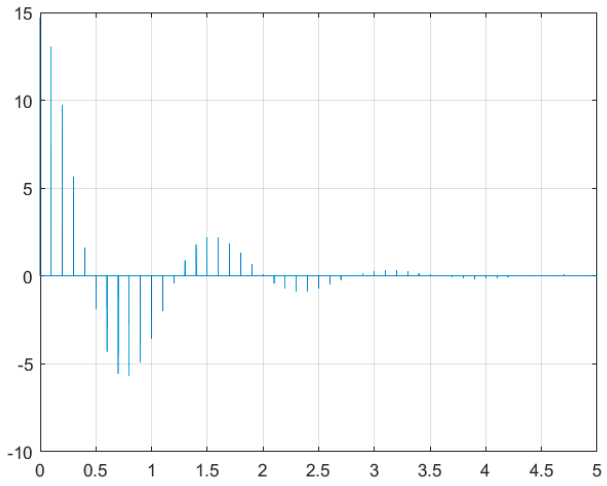


Рис. 4. Вид сигнала на выходе идеального амплитудно-импульсного модулятора

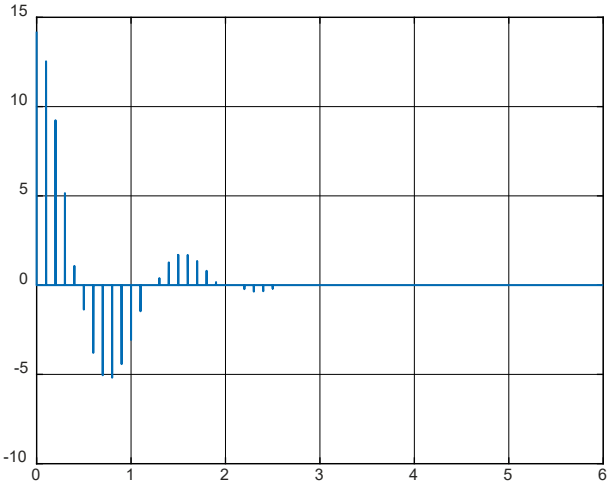


Рис. 5. Вид импульсного сигнала на выходе нелинейности

ной непрерывной, а также импульсной САУ. В случае непрерывной САУ были получены следующие точки переключения: t_1= 0.4288 с., t_2 = 0.4571 с., t_3 = 1.1931 с., t_4 = 1.2663 с., t_5 = 1.9276 с., t_6 = 2.1236 с., t_7 = 2.5888 с. В случае импульсной САУ: t_1 = 0.4 с., t_2 = 0.5 с., t_3 = 1.2 с., t_4 = 1.3 с., t_5 = 1.9 с., t_6 = 2.1 с, t_7 = 2.6 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Библиографический список

1. Синтез адаптивного наблюдателя для нелинейных нестационарных систем / Х. Т. Нгуен [и др.] // Научнотехнический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 4. С. 554–562. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-554-562.

2. Output Controller for Uncertain Nonlinear Systems with Structural, Parametric, and Signal Disturbances / A. Pyrkin [et al.] // IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 2012. DOI: 10.1109/CCA.2012.6402352.

3. *Furtat I. B., Gushchin P. A., Nguyen B. H.* Nonlinear control providing the plant inputs and outputs in given sets // European Journal of Control. 2024. Т. 76. С. 100944.

4. Analysis and Synthesis of Nonlinear Control Systems: A Convex Optimisation Approach / M. Bernal [et al.]. 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-90773-0.

5. *Hassan K.* Khalil. Nonlinear Systems. USA, 2013. 560 p.

6. *Shankar S.* Nonlinear Systems. Analysis, Stability, and Control. USA: Berkeley Publ., 1999. 675 p.

7. *Гречкин Н. Л., Ватаева Е. Ю., Шишлаков В. Ф.* Алгоритм вычисления точек переключения нелинейности «Зона нечувствительности» // Завалишинские чтения`25. 2025. С. 146–149.

УДК 004.021 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-153-157**

Д. А. Зырянов*
студент
Е. М. Бадика*
студент
А. П. Бобрышов*
аспирант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ В ЗАДАЧАХ ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТА В СРАВНЕНИИ С ЭВРИСТИЧЕСКИМИ

В статье рассмотрено и проанализировано применение генетических алгоритмов в задачах планирования маршрута. В материалах научного труда генетические алгоритмы сравниваются с эвристическими алгоритмами, а также представлены преимущества и недостатки рассматриваемых методик. Описаны варианты применения генетических алгоритмов в реальных задачах.
Ключевые слова: *генетический алгоритм, поиск пути, эвристика, A-star, оптимальные алгоритмы, субоптимальные алгоритмы, задача коммивояжера.*

D. A. Zyryanov*
Student
E. M. Badika*
Student
A. P. Bobryshov*
PhD Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INVESTIGATION OF THE APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS IN ROUTE PLANNING TASKS IN COMPARISON WITH HEURISTIC ONES

The article provides an analysis and consideration of the application of genetic algorithms in route planning tasks. In the materials of the scientific work, genetic algorithms are compared with heuristic algorithms, and the advantages and disadvantages of the considered methods are presented. The variants of application of genetic algorithms in real problems are described.
Keywords: *genetic algorithm, pathfinding, heuristics, A-star, optimal algorithms, suboptimal algorithms, traveling salesman problem.*

Все алгоритмы планирования маршрутов подразделяются на 2 общие категории [1]:

– оптимальные;

– субоптимальные.

Оптимальные алгоритмы гарантируют наилучшее выполнение условий построения маршрута: кратчайшая длина пути, лучшая проходимость пути, достижимость целевой точки и др. К оптимальным относятся: алгоритм полного перебора, алгоритм Дейкстры, алгоритм поиска в ширину. Оптимальные алгоритмы из-за проверки всех условий и вершин графа для достижения условия гарантированной оптимальности жертвуют производительностью. Из-за чего они чаще всего не применимы для крупных графов и в решении реальных задач. Для повышения производительности нахождения маршрутов были разработаны различные субоптимальные алгоритмы. Чаще всего в их основе заложена эвристика, позволяющая упрощать процесс вычисления. Эвристичестический алгоритм – это алгоритм, применяющий методы упрощения задач для более оптимального ее решения. Чаще всего под эвристикой в задачах поиска пути подразумевается целевая функция, которую необходимо минимизировать или максимизировать. Хорошим примером эвристического алгоритма является алгоритм A-star, суть которого заклю-

чается в выборе вершин графа, который удовлетворяет функции:

$$f(n) = g(n) + h(n),$$

где $f(n)$ – оценочное значение, присвоенное вершине n; $g(n)$ – стоимость пути от стартовой точки до вершины n; $h(n)$ – эвристическая оценка стоимости пути от вершины n до конечной точки.

Существуют различные модификации и разновидности алгоритма, позволяющие улучшить скорость его выполнения или качество находимых путей [1, 2]:

– Beam search (поиск по лучу): ограничивает список используемых вершин, при этом также упорядочевая его.

– Iterative deepening (итеративное погружение): проверяет следующие несколько шагов с целью проверки улучшения результата.

– Dynamic weighting (использование переменных весов): модификация, применяемая в графе с переменными весами, использующая функцию:

$$f(p) = g(p) + w(p)h(p),$$

где w(p) – веса ребер.

– Bidirectional search (двунаправленный поиск): модификация, в которой поиск производится с двух концов (начала и конца пути).

– Theta*: алгоритм, который может в качестве предка вершины указывать любую другую вершину графа (сокращая тем самым количество точек пути).

– Phi*: записывает предшественников из диапазона, определяемого специальными углами.

– RSR: дополнительный алгоритм сокращения прямоугольной симметрии, удаляет пустые пространства, тем самым сокращая количество проверяемых точек графа.

– JPS: модификация, сокращающая количество проверяемых точек благодаря поиску точек перехода.

Алгоритм A* с различными его модификациями является самым распространенным алгоритмом поиска маршрутов. Однако стоит заметить, что алгоритм может не так хорошо и быстро работать в больших графах, а также при большом количестве условий. В этом случае может быть сложно подобрать эвристику или сама по себе целевая функция будет не так эффективно влиять на выполнение алгоритма. Здесь стоит рассмотреть другой подход к решению оптимизационных задач, например, генетические алгоритмы.

Генетические алгоритмы – это класс алгоритмов, основанных на естественной природе улучшения свойств [3]. В данном случае подразумеваются природные процессы развития организмов. В теории алгоритмов были определены следующие термины, имеющие аналоги в генетической теории:

Бот, особь, агент – алгоритм, решающий поставленную задачу.

Генотип – параметры бота, алгоритма. Может представлять из себя строку с числовыми характеристиками алгоритма или с последовательностью инструкций.

Ген – составная часть генотипа или алгоритма. Например, одна инструкция, одна характеристика.

Поколение (генерация) – набор особей в одном том же моменте времени, из которого происходит отбор.

Из эволюционной теории математика заимствовала следующие факторы (движущие силы):

– естественный отбор – преимущественное выживание особей с более приспособленными характеристиками;

– борьба за существование – взаимодействие между всеми особями;

– наследственность – проявление признаков родительских форм;

– изменчивость – приобретение свойств, отличных от родительских форм.

Естественный отбор в теории алгоритмов определяет правило, по которому выбираются только те алгоритмы, которые лучше всего решают поставленную задачу. Борьба за существование характерна больше для алгоритмов, решающих состязательные задачи. Хорошим примером могут стать игры, например, шахматы, где алгоритмы должны побеждать других игроков.

Наследственность и изменчивость позволяют алгоритмам изменяться, тем самым приближая их к ответу. Наследственность реализуется через заимствование частей алгоритма (генов). Изменчивость реализуется чаще всего через мутации – случайные изменения генотипа. В случае с построением маршрутов могут быть выбраны следующие формы генотипа:

– строка с последовательностью вершин графа;

– строка с последовательностью операций для достижения конечной точки.

Первый вариант наиболее просто реализовать программно. Выбираются следующие параметры особей:

– длина генотипа;

– величина естественного отбора;
– сила мутаций;

Длина генотипа в данном случае будет показывать максимальную длину маршрута, который мы сможет найти. Для задания целевых точек первый и последний ген будут соответственно начальной и конечной вершинами. При этом, чтобы находить маршруты меньшей длины, позволим хранить в генотипе пустые значения. Процесс присваивания гену пустого значения обозначим как убивание гена.

Мутация будет подразумевать выбор n-ближайшей вершины от данной. Этот параметр задается как сила мутаций. При этом сила также будет хранить другой параметр характеризующий количество генов способных изменяться. Также необходимо задать вероятность того, как часто ген будет убиваться.

Скрещивание будет представлено в простейшем виде, с вероятностью 50% будет браться ген первого родителя или второго. При этом можно увидеть важное свойство скрещивания. Если гены у обоих родителей будут равны, то такой ген гарантировано останется и у дочернего бота. Так будет происходить закрепление свойств. Важным атрибутом работы генетических алгоритмов является задание функции оценки. Данная функция будет оценивать применимость алгоритма для данной задачи. В нашем случае функцией может служить полная длина пути. При этом непроходимость пути будет помечаться неким большим значением. Нельзя непроходимому пути присваивать значение бесконечности. В этом случае длина всех путей будет одинакова, что не даст возможности алгоритмам эволюционировать. Хорошим решением будет ввести коэффициент большого числа. Мы будем умножать длину непроходимого пути на этот коэффициент. Тем самым путь, который станет длиннее непроходимого, будет иметь меньшую целевую характеристику и будет отобран для дальнейшей эволюции.

Каждая генерация представляет следующую последовательность действий:

1. Алгоритмы работают, после чего оцениваются.
2. Отбирается процент лучших алгоритмов. Остальные убираются из поколения.
3. На основе лучших поколение добирается путем мутаций и скрещивания.
4. Цикл повторяется до тех пор, пока не будет найден алгоритм, удовлетворяющий условиям, или пока количество поколений не превысит какого-то определенного значения.

Первое поколение можно сгенерировать следующими способами:

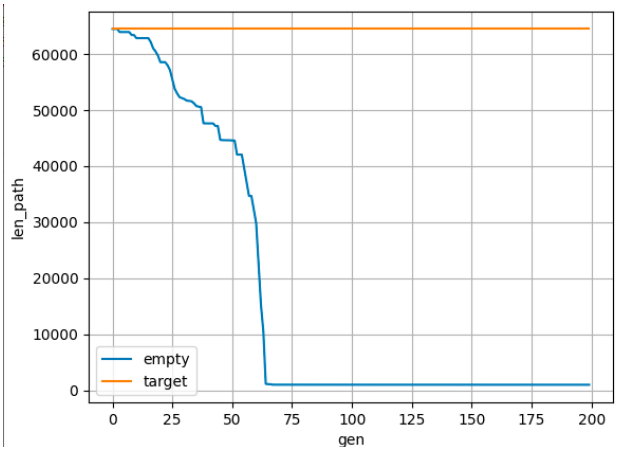


Рис. 1. Сравнение генерации с пустыми генами и с проинициализированными

– все гены проинициализировать пустыми;
– все гены проинициализировать со случайными вершинами;
– все гены проинициализировать целевыми точками.

В первом и последнем случаях первое поколение будет одинаковым. В следующих поколениях в пустых генотипах станут появляться новые вершины графа. При инициализации же через целевые точки следующие поколения будут подбирать новые вершины в окрестностях или будут ликвидировать гены. Графики изменения длины пути от количества генераций показывают эффективность метода пустой инициализации (рис. 1). При этом можно обратить внимание, что при инициализации конечными точками изменения происходят крайне медленно. Это обуславливается тем, что в генотипе существуют все вершины, потому при изменении вершины в середине генотипа будет получаться маршрут: (цель)–(новая точка)–(цель). Данный маршрут априорно длиннее.

Инициализация случайными вершинами может повлечь за собой проблему – первые маршруты будут неадекватными (рис. 2), из-за этого много генераций уйдет на ликвидацию генов. Результат эволюции представлен на рис. 3 для случайной генерации и на рис. 4 для псевдослучайной. Поэтому следует применять псевдослучайную генерацию, где вершины будут выбираться в соответствие какому-то правилу или эвристике, но случайно. Стоит учитывать, что может получиться ситуация как с инициализацией через конечные точки. При этом случайная и псевдослучайные генерации все равно проигрывают пустой инициализации в скорости достижения удовлетворительного результата.

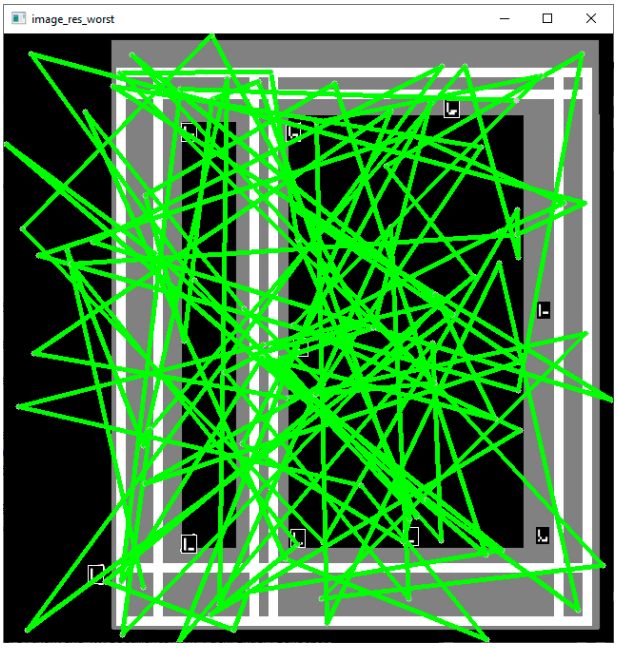


Рис. 2. Случайная генерация генотипа

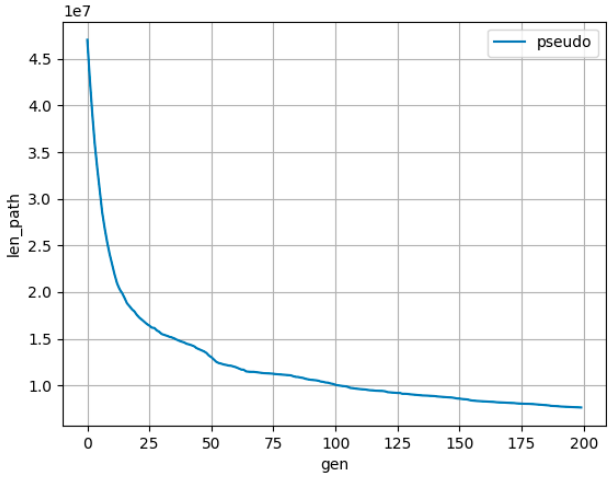


Рис. 3. Случайная генерация

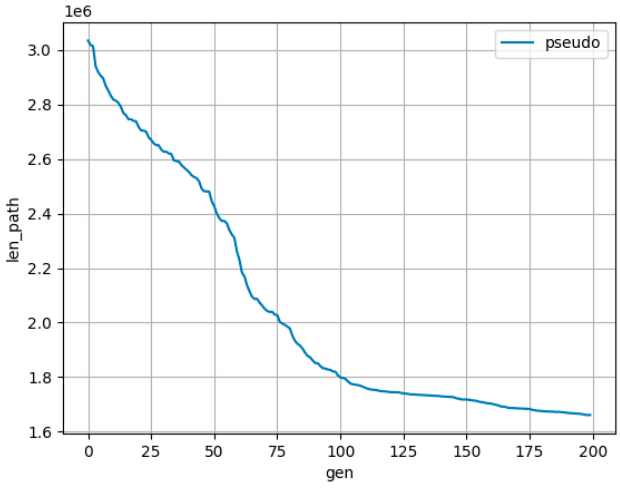


Рис. 4. Псевдослучайная генерация

Другим вариантом определения генотипа является кодирование последовательности операций. Этими операциями могут быть:

– оценка проходимости соседней вершины;

– оценка эвристики;

– различные операции с последовательность (переход к n-ой операции, цикл, пропуск операций);

– переход к вершине графа;

– проверка, была ли посещена вершина графа ранее.

Эволюция данного алгоритма может проходить значительно дольше до достижения каких-то значительных результатов. Однако конечное решение – бот – будет представлять из себя алгоритм, который можно применять многократно. Скорость работы такого алгоритма будет близка к скорости работы эвристических алгоритмов или даже превосходить ее.

Однако со всеми преимуществами есть и важный недостаток: необходимо заранее продумать все возможные операции. От этого будет зависеть конечная эффективность бота (нашего целевого алгоритма). И зачастую это бывает очень сложно сделать, а разработка таких операций часто будет занимать больше времени, чем разработка эвристики для субоптимальных алгоритмов.

Важно отметить, что при большом количестве генераций и неправильных параметрах подбор алгоритма может приближаться по времени к простому перебору с временной сложностью O(n!). Поэтому необходимо заранее продумать ограничения. В результате получаем значительное отступание по времени разработки эвристическим алгоритмам для поиска пути. Отсутствие гарантий к оптимальности пути (эволюция алгоритмов не всегда может протекать по верному пути).

Другой проблемой является сильное запоминание графа. Решением может стать постоянная смена графов для улучшения характеристик алгоритмов. Но данный подход может быть применен только к генотипу в виде последовательности операций, т. к. подход в виде кодирования вершин графа подразумевает конечный ответ для конкретных условий и графа. Однако стоит отметить простоту реализации, являющейся важным атрибутом при работе с большим количеством ограничений. Самым ярким примером является сопутствующее решение задачи коммивояжера [4]. Суть задачи заключается в посещении всех точек графа, в частности, чаще рассматривается задача посещения конкретных точек графа. Эвристические алгоритмы часто непригодны для решения данной за-

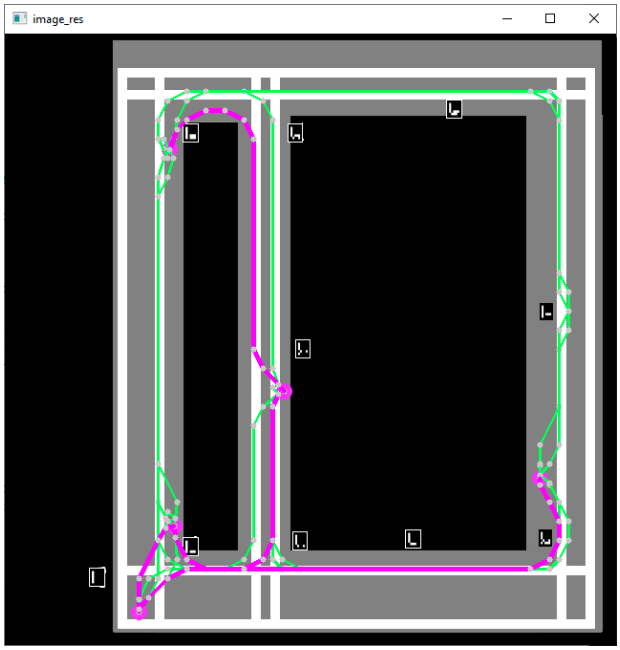


Рис. 5. Решение задачи коммивояжера

дачи. При решении этой задачи длина генотипа постоянная и равна количеству узлов графа, которые необходимо посетить. Длина путей между узлами может быть рассчитана с помощью эвристических алгоритмов построения пути. В этом случае генетический алгоритм хорошо справится со своей задачей благодаря малому количеству данных, которыми необходимо оперировать. Пример работы для нахождения оптимального пути между 5 разными точками показан на рис. 5 (яркой толстой линией отмечен итоговый путь).

Данные результаты приводят к выводу, что сами по себе генетические алгоритмы малопригодны для планирования маршрутов. Так, для получения результата генетическим алгоритмом для поиска пути в графе с количеством вершин n в вышеописанных примерах может понадобиться больше 50 эпох при размере поколения в 100 агентов. При этом вычисления могут проводиться над большими генотипами, в опытах использовались генотипы длиной 2.5n. В итоге получим больше 10000n вычислений, зачастую благодаря пустым генам их меньше, но при сложных маршрутах цифра будет близка или даже значительно больше, как было описано ранее. В это же время A* – представитель эвристических алгоритмов – получает решение менее чем за n вычислений. Однако генетические алгоритмы хорошо себя показывают в случаях, где нет точного решения или это решение крайне сложно отыскать. Так, связка генетических алгоритмов с эвристическими может дать много хороших возможностей. Например, с помощью эвристических алгоритмов можно узнавать веса графа, а с помощью генетических алгоритмов решать задачу оптимального посещения точек. В этом случае задача будет решаться быстро и с достаточным уровнем оптимальности.

Библиографический список

1. *Басараб М. А., Домрачева А. Б., Купляков В. М.* Алгоритмы решения задачи быстрого поиска пути на географических картах // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 11 (23). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/algoritmy-resheniya-zadachi-bystrogo-poiska-puti-na-geograficheskih-kartah (дата обращения: 02.12.2024).

2. Path Planning with Modified a Star Algorithm for a Mobile Robot / F. Duchoň [et al.] // Procedia Engineering. 2014. № 96. С. 59–69.

3. *Лушин А. В., Лиманова Н. И.* Применение генетических алгоритмов для решения задач построения маршрутов // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: Материалы II Всероссийской научной конференции с международным участием. В 2 ч., Тольятти, 22–24 апреля 2019 г. Том Часть 2. Тольятти: Изд. Качалин Александр Васильевич, 2019. С. 179–185. EDN BUHKNO.

4. *Лощилов И. Г., Племенос Д.* Генетические алгоритмы для решения задачи коммивояжера // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2007. № 2. С. 133–136. EDN TKBWBB.

УДК 62-03, 62-1/-9, 65.011.56, 67.02, 67.05 DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-158-165

К. С. Исаков*
аспирант
В. А. Семенова*
кандидат экономических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛАСТИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Рассмотрены подходы к производству пластиковых изделий в России, их принципы, стоимость и тираж. Приведены результаты анализа статистических данных о популярности методов изготовления пластиковых изделий для прототипирования. имитационной модели системы защиты информации в автоматизированных системах с учетом современных тенденций анализа уязвимостей. Исследование методов производится с точки зрения поиска наиболее прогрессивного, позволяющего внедрить процессы автоматизации и роботизации производства.
Ключевые слова: *литье полимеров, вакуумное литье, 3D-печать, обработка с числовым программным управлением, прототипирование, пластиковые изделия, автоматизация, роботизация.*

K. S. Isakov*
PhD Student
V. A. Semenova*
PhD Sc., Economic, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

METHODS OF MANUFACTURING PLASTIC PRODUCTS

The approaches to the production of plastic products in Russia, their principles, cost and circulation are considered. The results of the analysis of statistical data on the popularity of methods for the production of plastic products for prototyping are presented. simulation model of the information security system in automated systems taking into account modern trends in vulnerability analysis. The study of methods is carried out from the point of view of finding the most progressive, allowing the implementation of automation and robotization processes in production.
Keywords: *Polymer casting, vacuum casting, 3D printing, CNC processing, prototyping, plastic products, automation, robotics.*

Производство пластмасс имеет стратегическое значение для широкого спектра промышленных отраслей. Начиная от упаковки для пищевых продуктов, выполненной из полистирола, и заканчивая промышленными компонентами, изготовленными из инженерного полиэфирэфиркетона, производство пластмасс играет ключевую роль в современном промышленном производстве. В отсутствие возможности изготовления пластмассовых изделий было бы необходимо разрабатывать совершенно новые системы производства.

Однако производство пластмасс включает в себя множество разнообразных технологий. Выбор определенного метода зависит от множества факторов, таких как бюджет, конструкция изделия и используемый материал, что делает процесс принятия решения не всегда тривиальным. Самые популярные и проверенные временем методы изготовления пластиковых изделий приведены на рис. 1.

1. *Литье под давлением* представляет собой важный и широко применяемый метод производства пластмассовых изделий. Он основан на использовании термопластичных и термореактивных полимеров и предоставляет быстрый способ изготовления пластмассовых деталей. Процесс литья под давлением начинается с нагревания пластиковых гранул до достижения состояния расплавленного. Затем полученная масса заливается в металлическую форму с помощью возвратно-поступательного шнека. После этого расплавленный материал остывает и затвердевает, принимая форму полости формы. После процесса охлаждения твердая деталь извлекается из формы.

Литье под давлением позволяет создавать широкий спектр изделий из различных материалов, обладающих разнообразными формами и размерами. Однако для успешного изготовления деталей требуется, чтобы они имели тонкие и ровные стенки. Примеры изделий, произведенных мето-

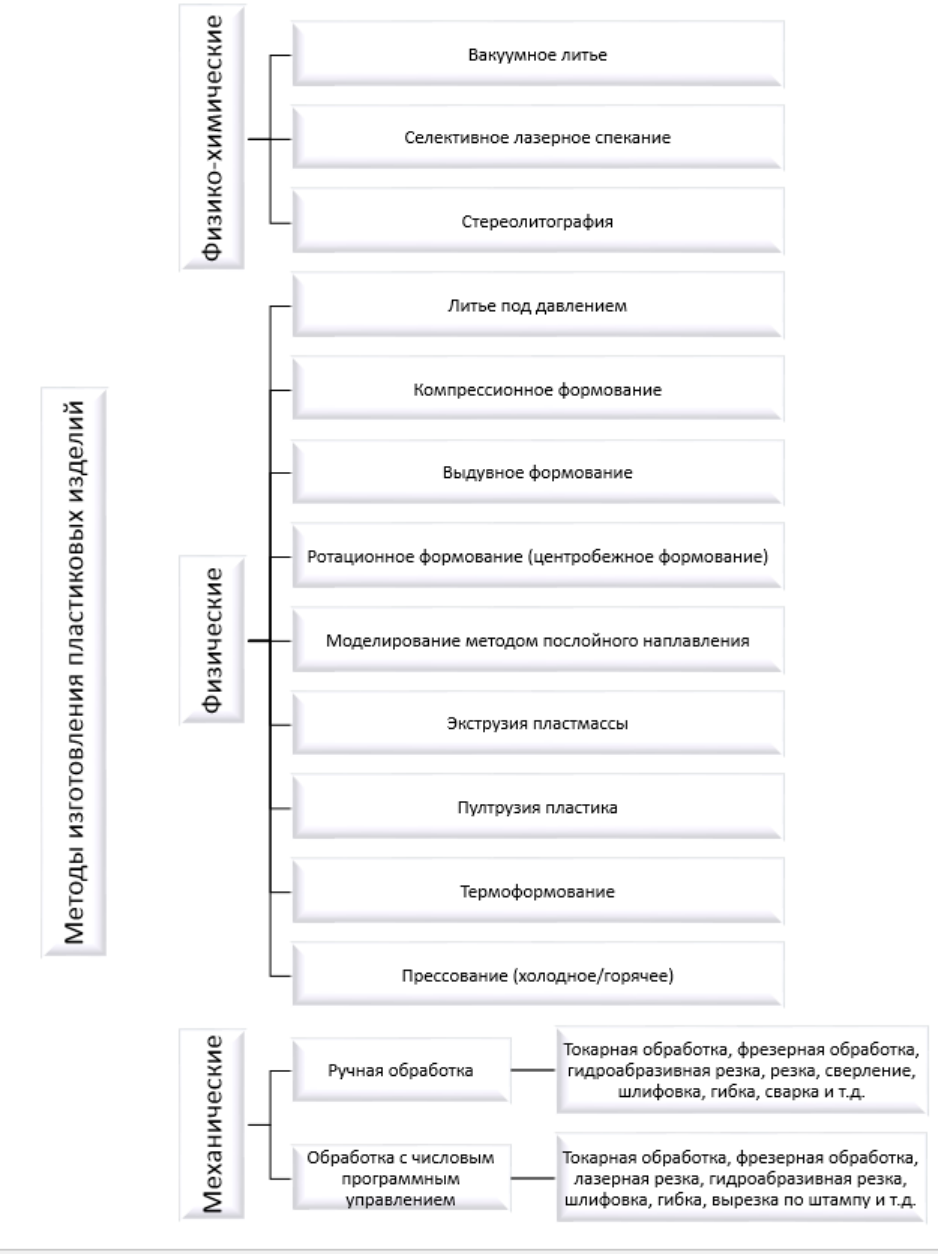


Рис. 1. Методы изготовления пластиковых изделий [1–3]

дом литья под давлением, включают одноразовые подносы для еды, приборные панели автомобилей, а также детали конструктора LEGO.

2. *Процесс выдувного формования* включает использование пресс-формы и расплавленной термопластичной трубки, известной как заготовка. В отличие от полностью расплавленных гранул, заготовка является основным материалом. Сжатый воздух подается в заготовку, заставляя пластик расширяться и принимать форму полости формы. В результате пластик соприкасается с внутренними стенками формы, формируя желаемую конфигурацию. Этот метод формирования пластмасс характеризуется тремя основными видами: экструзионно-выдувным формованием, выдувным формованием под давлением и выдувным формованием с растяжением.

Выдувное формование чаще всего используется для создания полых пластиковых изделий, таких как бутылки для воды. Наиболее распространенным материалом, применяемым при выдувном формовании, является высокоплотный полиэтилен (HDPE).

Примеры изделий, полученных методом выдувного формования, включают в себя бутылки

для жидкостей, бочки, топливные баки и другие полые пластиковые детали.

3. *Ротационное формование* – это процесс литья пластмасс, основанный на использовании высоких температур и низкого давления для создания пластмассовых деталей. Он осуществляется путем вращения формы, что позволяет переместить пластиковый материал внутри формы и создать требуемую деталь. Порошкообразный пластик помещается в форму, которая подвергается нагреванию и начинает вращаться вокруг двух или более осей. Благодаря этому вращению расплавленный пластик равномерно распределяется по всей внутренней поверхности формы и принимает форму полости.

Преимущества ротационного формования включают более простую конструкцию оснастки, обеспечение постоянной толщины стенок детали и создание прочных внешних углов. Однако процесс может быть относительно медленным из-за необходимости полного охлаждения формы перед извлечением детали. Примерами изделий, изготовленных методом ротационного формования, являются контейнеры, емкости для хранения и различные игрушки.

4. *Компрессионное формование* представляет собой технологический процесс, в ходе которого термореактивные или термопластичные материалы нагреваются до необходимой температуры, а затем сжимаются в форме под воздействием значительных сил давления. Это позволяет создать изделия заданной геометрии с высокой точностью. После прессования материал подвергается отверждению, что обеспечивает стабильность формы и предотвращает деформацию готового изделия в процессе эксплуатации.

Данный метод широко применяется для производства компонентов различной длины, толщины и уровня сложности. Изделия, полученные методом компрессионного формования, обладают рядом преимуществ: они характеризуются повышенной прочностью, малым весом, высокой жесткостью и устойчивостью к воздействию коррозии. Такие свойства делают их привлекательными для применения в авиационной, автомобильной, строительной и других отраслях промышленности.

Кроме того, компрессионное формование предоставляет уникальную возможность интеграции сложных конструктивных элементов непосредственно в процесс формования, что снижает необходимость в дополнительной обработке и сборке. Несмотря на то, что скорость этого процесса уступает литью под давлением, его гибкость и возможность работы с разнообразными материалами и формами значительно расширяют сферу применения и делают его незаменимым в случаях, где требуются точность и сложность конструкции.

5. *Вакуумное литье* представляет собой высокоточный технологический процесс изготовления пластиковых изделий, который широко применяется для производства ограниченных партий прототипов, включая изделия сложной формы, текстуры и различные варианты цветового исполнения. Основу данного метода составляет использование силиконовых форм для создания деталей из уретановых пластиков, что обеспечивает высокую детализацию и качество поверхности готовых изделий.

Процесс вакуумного литья начинается с подготовки силиконовой формы, которая изготавливается на основе мастер-модели, созданной, как правило, с использованием технологии 3D-печати или жертвенных изделий. В подготовленную форму заливается уретановая смола, после чего заготовка помещается в вакуумную камеру. Удаление воздуха в процессе вакуумирования устраняет воздушные включения и пузырьки, что позволяет достичь исключительной гладкости поверхности и равномерности материала. На завершающем этапе изделие подвергается термической обработке (полимеризации) в печи, где смола затвердевает, формируя окончательную структуру детали. Здесь нужно отметить наличие отечественных материалов, не требующих термической обработки.

Метод вакуумного литья отличается высокой универсальностью и позволяет получать как полностью прозрачные, так и частично прозрачные изделия, глянцевые и матовые, что делает его особенно востребованным в прототипировании и при изготовлении экспериментальных образцов. Среди типичных изделий, создаваемых данным способом, можно выделить корпуса и крышки для электроники, декоративные элементы, детали для ВПК, автомобильной отрасли, авиации, космических технологий, медицинского оборудования, оптических приборов, спортивного инвентаря, устройств для исследования окружающей среды, а также модели с высокой степенью детализации, предназначенные для проверки эргономики и функциональности. Высокая точность воспроизведения мелких деталей и текстур делает вакуумное литье незаменимым инструментом для промышленного дизайна, инженерии и разработки инновационных продуктов.

6. *Механическая обработка пластмасс* является важным и популярным процессом в про-

изводстве пластиковых изделий. Этот процесс включает в себя использование различных методов, таких как фрезерование с числовым программным управлением (ЧПУ), токарная обработка с ЧПУ и другие смежные процессы. Методы могут различаться в зависимости от используемого оборудования, основная цель обработки пластмасс обычно заключается в вырезании участков из пластмассовой заготовки с помощью ручных или автоматически управляемых режущих инструментов.

Обработка пластика также позволяет соединять детали, изготовленные различными методами, такими как экструзия. Этот процесс совмещения различных элементов позволяет создавать более сложные и функциональные изделия.

Примеры изделий, полученных путем обработки пластика: разнообразные промышленные детали, оснастку и приспособления, а также элементы автомобильного освещения. Эти детали обладают высокой точностью и качеством изготовления, что делает их востребованными в различных отраслях промышленности.

7. *Моделирование методом послойного наплавления* (Fused Deposition Modeling, FDM) является одним из наиболее распространенных методов 3D-печати для изготовления изделий из пластика. Этот процесс основывается на использовании термопластичных материалов, таких как ABS и PLA, а также современных высокотемпературных полимеров, включая PEEK и PETG. В технологии FDM применяется экструдированная термопластичная нить, которая нагревается и выкладывается через движущееся сопло, прикрепленное к печатающей головке, в точном соответствии с цифровой моделью, заданной компьютерной программой.

Процесс построения осуществляется послойно, начиная с основания и завершая формированием полного трехмерного объекта. Такой метод отличается высокой скоростью производства и экономической эффективностью при изготовлении деталей в небольших объемах. Он особенно подходит для создания объектов с сложной внутренней геометрией, благодаря чему используется в инженерных и дизайнерских разработках. Однако данный метод ограничен в плане механической прочности создаваемых деталей, что связано с их послойной структурой.

Примеры применения FDM включают изготовление различных прототипов, запасных частей, элементов научного оборудования и композитных изделий для промышленного применения. Технология находит применение в быту, образовательных учреждениях и опытных производствах, где требуется быстрое и недорогое создание моделей.

8. *Стереолитография* (Stereolithography, SLA) представляет собой одну из высокоточных технологий 3D-печати, основанную на использовании жидких фотополимерных смол, которые затвердевают под воздействием направленного светового излучения, например, лазера. В процессе SLA избирательное отверждение материала осуществляется в соответствии с цифровой моделью, слой за слоем, по мере перемещения платформы через резервуар со смолой.

Ключевым преимуществом стереолитографии является возможность создания деталей с высокой степенью гладкости поверхности и точности воспроизведения сложных форм. Этот метод также позволяет изготавливать полупрозрачные изделия и элементы с хрупкой, но чрезвычайно детализированной структурой. Однако ограничением SLA является более высокая стоимость материалов и оборудования по сравнению с FDM, а также сравнительно низкая механическая прочность полученных объектов.

Стереолитография нашла широкое применение в создании прототипов, где требуется высокая детализация и качество поверхности. Она активно используется в стоматологии для производства ортодонтических выравнивателей и зубных моделей, в ювелирном деле для изготовления мастер-моделей, применяемых в литье, а также в медицине для создания биосовместимых имплантатов. Среди типичных изделий, изготавливаемых методом SLA, можно выделить прототипы дисплеев, стоматологические устройства, литейные модели для ювелирных изделий, а также микрообъекты для исследований в области микроэлектроники и нанотехнологий.

9. *Селективное лазерное спекание* (SLS) базируется на последовательном спекании порошковых материалов, таких как полиамиды и пластик, с использованием лазерного луча. В общих чертах процесс напоминает аддитивное производство металлов – селективное лазерное плавление (SLM). Одним из главных преимуществ SLS перед другими методами 3D-печати из пластика является отсутствие необходимости в использовании опорных конструкций. Основное применение SLS – изготовление деталей из нейлона и алюминия.

В большей степени, нежели FDM или SLA, SLS рассматривается как промышленный процесс аддитивного производства и наиболее востребован в автомобильной промышленности.

Примеры деталей, изготовленных с использованием технологии SLS, включают оснастку, автомобильное оборудование и электрические разъемы.

10. *Экструзия пластика* представляет собой процесс продавливания пластического материала через матрицу с целью создания удлиненной детали с постоянным профилем. Этот метод изготовления, часто применяемый для производства больших объемов пластиковых изделий, начинается с нагревания пластика в цилиндре, после чего он прессуется с помощью возвратно-поступательного шнека, придавая материалу окончательную форму с непрерывным профилем. Полученный экструдированный пластик затвердевает по мере остывания.

Типичные материалы, используемые в экструзии, включают полиэтилен, полипропилен, ацеталь и нейлон. Этот процесс также может включать различные варианты, такие как экструзия пленки с раздувом или производство пластиковых труб.

Примерами изделий, получаемых методом экструзии, являются трубы, трубки, оконные рамы и другие удлиненные детали с непрерывным профилем.

11. *Пултрузия* является специфическим метод экструзии пластмасс, в отличие от которого материал протягивается через матрицу, а не продавливается. Эта технология применяется для изготовления армированных волокнами пластмасс. Процесс пултрузии начинается с протяжки рулона армированных волокон через резервуар с пластиковой смолой. Пластиковая смола пропитывает волокна, а затем смесь проходит через нагретую матрицу, придавая армированному волокном полимеру его индивидуальный профиль.

В пултрузии используются различные виды пластиковых смол, включая полиэстер, полиуретан и эпоксидную смолу. Стекловолокно является наиболее распространенным армирующим материалом, хотя также могут применяться и другие типы волокон.

Примерами изделий, изготовленных методом пултрузии, являются стержни жесткости, лыжные палки и различные конструкционные детали, армированные волокнами. Этот метод производства позволяет создавать легкие, прочные и долговечные изделия с высокой степенью армирования.

12. *Прессование* – это еще один процесс изготовления пластиковых изделий, основанный на приложении механических усилий для формования заготовок. Удары наносятся на заготовки с помощью молотка или другого инструмента для придания им заданной формы. Особенностью прессования является то, что после завершения процесса материал приобретает улучшенные механические свойства, включая повышенную ударопрочность, что достигается за счет структурных изменений в материале, вызванных процессами формования и термической обработкой.

Прессование подразделяется на два основных типа в зависимости от температуры, при которой осуществляется процесс:

– **Горячее прессование** проводится при нагревании заготовки до температуры выше точки рекристаллизации. Нагрев приводит к вытеснению газов из материала, что улучшает зернистую структуру и механические характеристики. После приложения усилия заготовка приобретает желаемую форму, сохраняя высокую прочность и плотность. Этот метод особенно эффективен для производства изделий с высокими требованиями к механическим характеристикам.

– **Холодное прессование**, напротив, проводится при температуре окружающей среды. Оно позволяет добиться высокой точности и плотности заготовок, сохраняя их вязкость. Этот метод применяется для изготовления инструментов, столовых приборов, а также деталей для автомобильного и железнодорожного транспорта.

Оба подхода находят широкое применение в промышленности, так как позволяют производить изделия с высокой точностью и устойчивостью к механическим воздействиям.

13. *Термоформование* представляет собой процесс изготовления изделий из пластика, при котором используется нагретый до мягкого состояния пластиковый лист вместо полностью расплавленного материала. В этом процессе задействуются такие инструменты, как нагревательные печи, пресс-формы и вакуумные столы. Листовой материал нагревается, а затем растягивается и формуется по заданной форме, чаще всего с использованием вакуумной технологии. Завершающими этапами являются обрезка излишков и охлаждение изделия.

Особенностью термоформования является его универсальность, что делает метод подходящим как для небольших серий производства, так и для массового выпуска продукции. Он позволяет изготавливать изделия различных размеров и форм, начиная от простых контейнеров и заканчивая сложными деталями. Термоформование находит применение в ряде отраслей, включая: упаковочные технологии (изготовление блистеров, пластиковых контейнеров,

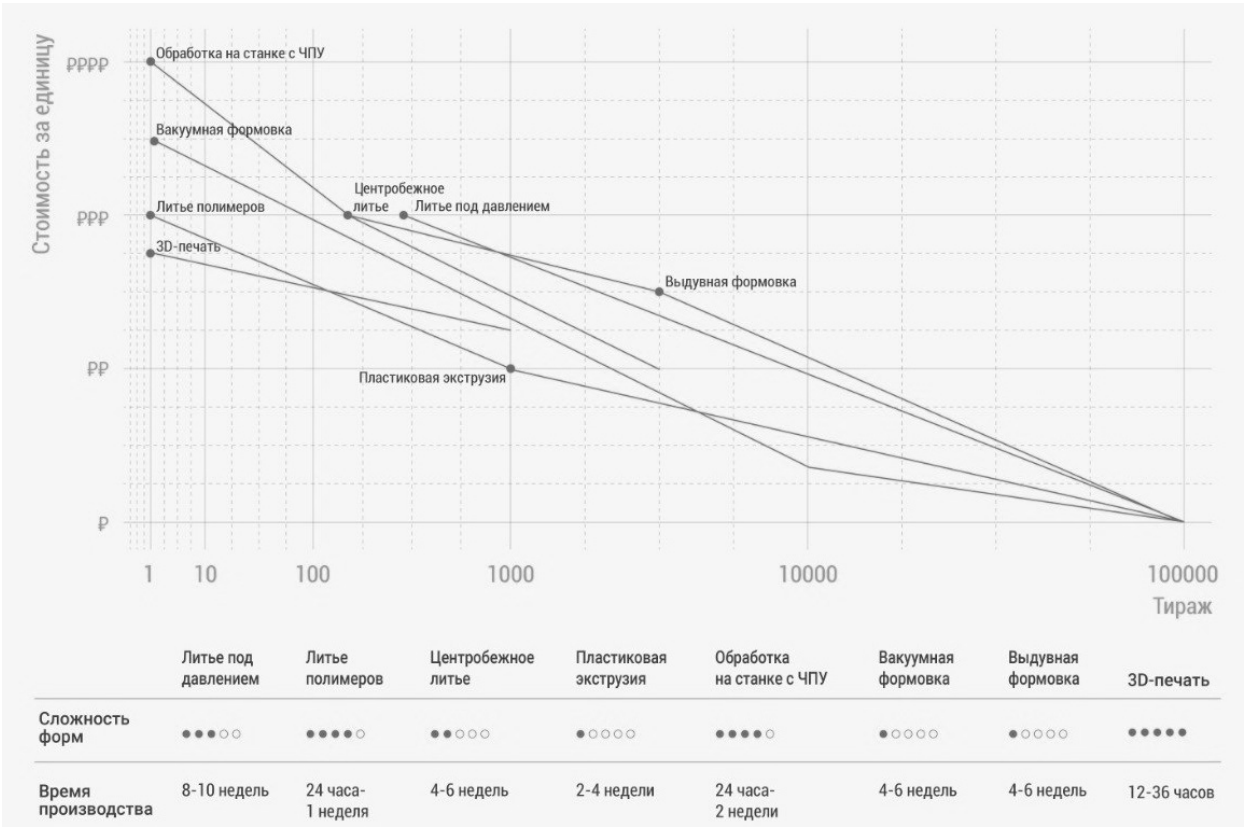
поддонов); автомобилестроение (детали салона, элементы экстерьера); производство медицинских приспособлений (протезы, упаковка стерильных инструментов); изготовление игрушек и товаров широкого потребления.

Этот процесс отличается экономичностью и скоростью, что делает его оптимальным выбором для множества применений.

Рассматривая технологии производства полимерных изделий в контексте мировой промышленности, следует отметить, что Россия активно вовлечена в процесс Четвертой промышленной революции. Это включает значительные преобразования в области роботизации, цифровизации и внедрения киберфизических систем, которые затрагивают не только производственные процессы, но и социально-экономическую сферу [4–5]. Однако, несмотря на имеющиеся достижения, Россия сталкивается с рядом проблем, связанных с низким уровнем цифровизации и недостаточным финансированием инновационной деятельности. Эти факторы существенно ограничивают развитие и внедрение новых технологий.

Кроме того, в современной экономической среде наблюдается неопределенность, усугубляемая ужесточением кредитно-денежной политики, снижением доли государственного финансирования и отсутствием стратегического планирования на долгосрочную перспективу. Эти обстоятельства приводят к сокращению масштабов производства и ограничению его многообразия, что отрицательно сказывается на разработке и реализации новых проектов.

Согласно исследованию В. С. Минчичовой, Россия занимает шестое место в мире по потенциалу роботизации и автоматизации, уступая таким странам, как Китай, Индия, США, Бразилия и Индонезия [6]. Это подтверждает значительные возможности страны в развитии высокотехнологичных производств. Однако для реализации данного потенциала необходимо наличие современных производственных мощностей и оборудования, включая фрезерные, токарные, лазерные, шлифовальные станки с ЧПУ, литьевые формовочные и штамповочные машины. Такие технологии ориентированы на массовое производство (от тысячи единиц), что делает их менее пригодными для производства прототипов и изделий, необходимых для узкоспециализированных отраслей, таких как медицина, оборонная промышленность и авиация.



	Литье под давлением	Литье полимеров	Центробежное литье	Пластиковая экструзия	Обработка на станке с ЧПУ	Вакуумная формовка	Выдувная формовка	3D-печать
Сложность форм	●●●○○	●●●●○	●●○○○	●○○○○	●●●●○	●○○○○	●○○○○	●●●●●
Время производства	8-10 недель	24 часа-1 неделя	4-6 недель	2-4 недели	24 часа-2 недели	4-6 недель	4-6 недель	12-36 часов

Рис. 2. Методы производства корпусов из пластмасс [8]

В современных условиях модернизация производственной сферы базируется на внедрении механизации и автоматизации, особенно в мелкосерийном и единичном производстве, где разнообразие номенклатуры требует высокой гибкости. В таких случаях упор делается на адаптивность производства, его способность к оперативной перенастройке под изменяющийся ассортимент продукции. Учитывая, что массовое производство промышленной продукции составляет менее 20% общего объема производства, становится очевидной актуальность гибкой автоматизации [6–7].

В исследованиях FORMLUB, исходя из своей статистики, приводит график зависимости стоимости изделий от тиража, также указывая на время выполнения заказа и сложность форм.

На рис. 2 видно, что самым дешевым методом изготовления пластиковых корпусов является пластиковая экструзия, но минимальный тираж равен тысяче единиц. В свою очередь, для прототипов (изделия от 1 единицы) подходят следующие способы: 3D-печать, литье полимеров, вакуумная формовка (термоформование) и обработка на станках с ЧПУ.

Согласно отчету исследовательского агентства Mordor Intelligence, объем мирового рынка ЧПУ к 2024 г. оценивается в 100,78 млрд долл. США, а к 2029 г. ожидается его увеличение до 146,65 млрд долл. США при среднем ежегодном темпе роста 7,79% [9]. Это свидетельствует о высоком потенциале технологий ЧПУ и необходимости их более широкого внедрения в российской промышленности.

В области аддитивных технологий Россия значительно уступает мировым лидерам. По числу патентов страна занимает девятое место, отставая от таких стран, как Китай, Япония и США. Импорт 3D-принтеров в Россию в 2022 г. снизился на 97,7% в натуральном выражении, а экспорт составил всего 12 единиц общей стоимостью 409,6 тыс. руб. [10]. Точное количество работающего 3D-оборудования в стране неизвестно, однако эксперты компании *«Инфомайн»* подсчитали, что в 2021 г. в Россию было ввезено около 7,1 тыс. единиц такого оборудования. Эти данные указывают на необходимость активного развития внутреннего производства 3D-принтеров и сопутствующих технологий для укрепления позиций России на мировом рынке.

Исследования показывают, что самыми популярными средствами прототипирования являются ЧПУ-станки и 3D-принтеры. Точные данные о доле производства, которую занимает литье полимеров, отсутствуют. Используя статистику Яндекс, можно сформировать примерное представление о популярности каждого из методов производства пластиковых изделий. Самыми популярными запросами в своих категориях оказались: «ЧПУ обработка», «3д печать» и «Вакуумное литье» (таблица).

Таблица

Статистика аналитики Яндекс по поисковым запросам «ЧПУ обработка», «3д печать», «Вакуумное литье»

Запрос	Год	Среднее значение запросов за год	Доля от общего числа запросов
ЧПУ обработка	2021	7140	14,8
	2022	7180	13,2
	2023	7731	12,7
	2024	7668	11,2
3д печать	2021	40161	83,1
	2022	46001	84,8
	2023	51889	85,4
	2024	59711	87,3
Вакуумное литье	2021	1038	2,1
	2022	1069	2,0
	2023	1113	1,8
	2024	983	1,4
Общее число запросов	2021	48339	
	2022	54250	
	2023	60733	
	2024	68362	

В последние годы наиболее популярным запросом в области технологий производства стал «3D-печать» (более 80% поисковых запросов). Это объясняется доступностью оборудования, разнообразием доступных устройств, а также сформировавшейся популярностью метода среди широкого круга пользователей. Одновременно, запросы, связанные с «вакуумным литьем», составляют менее 2%, однако интерес к этому методу, как и число исследований в данной области, демонстрирует тенденцию к росту. Это, вероятно, связано с насыщением возможностей модернизации более популярных технологий и открытием перспектив вакуумного литья для решения уникальных задач.

Вакуумное литье представляет собой высокоточный процесс, идеально подходящий для изготовления и копирования сложных форм. Технология позволяет быстро производить от 10 до 500 единиц изделий, являющихся точными копиями оригинала, с минимальными изменениями размеров, качества и текстуры поверхности. Этот метод хорошо сочетается с аддитивными технологиями, такими как 3D-печать, выступая в роли завершающего этапа, когда тре-

буется многосерийное производство на основе мастер-модели.

Одним из ключевых преимуществ вакуумного литья является универсальность в выборе материалов. Использование различных смесей и примесей дает возможность придавать изделиям широкий спектр механических, химических и термических свойств. Это позволяет применять метод для создания изделий, требующих повышенной термостойкости, гибкости, прозрачности или других специфических характеристик. Например, материалы на основе уретанов способны сочетать прочность и гибкость, что делает их востребованными в таких сферах, как прототипирование, производство корпусов электроники, медицинских устройств и деталей автомобилей.

Современные разработки в области роботизации и автоматизации открывают новые горизонты для вакуумного литья. Введение роботизированных систем позволяет значительно повысить точность дозировки сырья, улучшить контроль качества на всех этапах производства и сократить время цикла изготовления. Роботы, оснащенные системами машинного зрения и датчиками, могут обеспечить бесконтактный контроль параметров процесса, таких как давление, температура и время выдержки, что особенно важно для производства изделий с узкими допусками.

Автоматизация вакуумного литья также способствует повышению производительности и снижению себестоимости продукции, делая метод конкурентоспособным даже в условиях массового производства. Кроме того, использование роботизированных комплексов позволяет минимизировать человеческий фактор, что особенно актуально для производства высокоточных деталей.

Несмотря на очевидные преимущества, вакуумное литье остается недооцененным методом. Это связано с относительно низким уровнем информированности о его возможностях и недостаточным количеством доступных исследований. Однако с развитием технологий автоматизации и материаловедения этот метод имеет все предпосылки для значительного расширения сферы применения.

Будущие исследования и разработки в области вакуумного литья должны быть направлены на совершенствование используемых материалов, разработку новых смесей с заданными свойствами и интеграцию роботизированных решений для повышения эффективности и качества процесса. Это позволит сделать вакуумное литье одним из ключевых методов в производстве сложных пластиковых изделий, способных удовлетворить запросы даже самых требовательных отраслей, таких как медицина, электроника и аэрокосмическая сфера.

Библиографический список

1. Производство пластиковых изделий. URL: https://telemento.ru/blog/proizvodstvo-plastikovykh-izdeliy/ (дата обращения: 15.11.2024).

2. 12 методов изготовления изделий из пластика и примеры их использования [часть 1]. URL: https://www.stankoff.ru/blog/post/573 (дата обращения: 12.12.2024).

3. 12 методов изготовления изделий из пластика и примеры их использования [часть 2]. URL: https://www.stankoff.ru/blog/post/576 (дата обращения: 12.12.2024).

4. *Владзиевский А. П., Белоусов А. П.* Основы автоматизации и механизации технологических процессов в машиностроении. М.: Высш. шк., 1966.

5. *Хомченко В. Г., Федотов А. В.* Автоматизация технологических процессов и производств: учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. 488 с.

6. *Минчичова В. С.* Россия в «Индустрии 4.0»: перспективы включения в мировую экономику // Международный научный журнал «Молодой ученый». 2020. № 24. С. 196–198.

7. *Кузнецов А. В.* Устойчивое развитие России в мировой экономике // Проблемы теории и практики управления. 2019. № 10. С. 68–82.

8. Как выбрать метод производства пластикового корпуса. URL: https://formlab.ru/blog-page/763-kak-vybrat-metod-proizvodstva-plastikovogo-korpusa-8-sposobov (дата обращения: 03.12.2024).

9. Анализ размера и доли рынка ЧПУ – тенденции роста и прогнозы (2024–2029 гг.). URL: https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/computer-numerical-controls-market (дата обращения: 08.12.2024).

10. Объем мирового рынка аддитивной печати. URL: https://mashnews.ru/pechat-moya-svetla.-kogda-3dprinteryi-okonchatelno-izmenyat-mir.html (дата обращения: 08.12.2024).

УДК 519.687.1 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-166-169**

В. Г. Курбанов*,**
кандидат физико-математических наук, доцент
** Институт проблем машиноведения Российской академии наук*
***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАМЕНТА ВОДИТЕЛЯ

Предложен метод оптимизации проезд автомобиля по заданной трассе водителями различного темперамента. Разработанные алгоритмы на основе предложенного метода позволяют повысить эффективность для правильного принятия решения при управлении движением, исключающим аварийные ситуации.
Ключевые слова: *метод оптимизации, темперамент человека, интеллектуальный робот.*

V. G. Kurbanov*,**
PhD, Phys.-Math., Associate Professor
** Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences*
***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

METHOD FOR OPTIMIZING VEHICLE SPEED TAKEN INTO ACCOUNT OF DRIVER'S TEMPERAMENT

Drivers of different temperaments propose a method for optimizing the passage of a car along a given route. The developed algorithms based on the proposed method allow increasing the efficiency for the correct decision-making in traffic control, excluding emergencies.
Keywords: *optimization method, human temperament, intelligent robot.*

Введение

В последнее время успехи в разработке интеллектуальных роботов (ИР) расширяют сферу их деятельности, связанную выполнением технологических операций в коллективе с человеком. При этом предполагаемые функции таких роботов должны быть значительно шире, чем просто выполнение механических операций. Например, робот, обслуживающий пожилого больного пациента, не может просто настаивать на приеме пациентом нужного лекарства в нужное время [1]. Рано или поздно из-за особенностей психики человека может возникать конфликтная ситуация между роботом и человеком, многочисленные варианты которой мы наблюдаем при общении обычных врачей и сиделок с пациентами. Исключение конфликтов, когда место человека занимает робот, усложняется восприятием его как механического устройства, которого можно игнорировать. Подобный простой пример и другие известные [2, 3] демонстрирует актуальность решения проблемы психологического взаимодействия робота и человека. При этом одним из важнейших является учет темперамента человека. Для этого необходимо, прежде всего провести анализ свойств темперамента человека и существующих методик его выявления [4, 5] и предложить новые алгоритмы адаптации робота к темпераменту человека.

Для адаптации поведения ИР, взаимодействующего с человеком, с учетом текущей ситуации при принятии решения необходима оценка степеней принадлежности человека, с которым он взаимодействует, к тому или иному типу темперамента. При этом целесообразно учесть рекомендации психологов по взаимодействию с человеком различного темперамента [6]. Например, темперамент водителя оказывает влияние на время его реакции и поведение на дороге, что сказывается на безопасности дорожного движения [7–10].

В качестве примера учета влияния темперамента рассматривается метод оптимизации проезда автомобиля по заданной трассе водителями различного темперамента с роботом-ассистентом (штурманом). При этом трасса содержит несколько участков, каждый из которых содержит прямые отрезки и повороты.

1. Метод оптимизации проезда автомобиля

1.1. Постановка задачи

Проехать заданный участок (например, первый) трассы без аварий, не превышая максимальную скорость, за минимальное время без учета темперамента водителя и с учетом ограничений.

Составим критерия оптимальности в виде функционала следующего вида:

$$J = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4) \to \min;$$

$$J = \left(\frac{v_1 - v_0}{a_u} + \frac{s_2}{v_2} + \frac{v_2 - v_3}{a_r} + \pi \frac{R_1 \psi_1}{180 v_4} \right) =$$

$$\left(\frac{v_1 - v_0}{a_u} + \frac{\left(\begin{array}{l} s - v_0 \dfrac{v_1 - v_0}{a_u} - \dfrac{(v_1 - v_0)^2}{2a_u} - \\ -v_2 \dfrac{v_2 - v_3}{a_r} + \dfrac{(v_2 - v_3)^2}{2a_r} - \pi \dfrac{R_1 \psi_1}{180 v_4} \end{array} \right)}{v_2} + \right.$$

$$\left. + \frac{v_2 - v_3}{a_r} + \pi \frac{R_1 \psi_1}{180 v_4} \right) \to \min \qquad (1)$$

при следующих ограничениях,

$$s_1 + s_2 + s_3 + s_4 = S \qquad (2)$$

т. е.

$$v_0 \cdot t_1 + \frac{a_u}{2} \cdot t_1^2 + v_2 t_2 + v_2 t_3 - a_T \frac{t_3^2}{2} + \pi \frac{R_1 \psi_1}{180.v_4} = S,$$

$$v_1 = v_2 \le v_{\max}; \qquad (3)$$

$$v_3 = v_4 \le v_k, \qquad (4)$$

где S – длина первого участка трассы; s_1, s_2, s_3, s_4 – длины отрезков первого участка трассы, соответственно, s_1 – отрезок разгона, s_2 – отрезок равномерного движения, s_3 – отрезок торможения, s_4 – отрезок поворота автомобиля; v_1, v_2, v_3, v_4 – скорости движения автомобиля соответственно, в отрезках s_1, s_2, s_3, s_4 первого участка трассы; v_0 – начальная скорость автомобиля на первом участке трассы; a_u– ускорение автомобиля; a_T – ускорение торможения автомобиля; $v_{\max}$ – максимальная скорость на трассе; v_k – критическая скорость перед поворотом на трассе; R_1 –радиус поворота на первом участке трассы; Ψ_1 – угол поворота на первом участке трассы; t_1, t_2, t_3, t_4 – время прохождения автомобиля соответственно, в отрезках s_1, s_2, s_3, s_4 – первого участка трассы.

$$s_1 > 0,\ s_2 \ge 0,\ s_3 \ge 0,\ s_4 > 0,$$
$$v_0 \ge 0,\ v_1 > 0,\ v_2 \ge 0,\ v_3 \ge 0,\ v_4 > 0.$$

1.2. Метод решения без учета темперамента водителя

Вводные данные:

Длина пути (первый участок трассы) автомобиля S, отрезки пути s_1, s_2, s_3, s_4.

$$s_1 + s_2 + s_3 + s_4 = S.$$

Скорости на отрезках соответственно v_1, v_2, v_3, v_4.

Известны: v_k – критическая скорость перед поворотом на трассе, $v_{\max}$ –максимальная скорость на трассе, a_u– ускорение автомобиля на первом отрезке участка трассы, a_T –ускорение торможения автомобиля на третьем отрезке участка трассы , R_1 – радиус поворота на первом участке трассы, Ψ_1 – угол поворота на первом участке трассы, φ_1-коэффициенты сцепления с дорогой на первом участке трассы, t_p- время на отрезке разгона на первом участке трассы, t_T – минимальное время торможения на отрезке торможения на первом участке трассы.

1. Начало. Вычисляется $s_4 = (\pi R_1 \psi_1)/180$.
2. Проверяется $\Delta_1 = S - s_4$.
3. Если $\Delta_1 < 0$, то STOP «Ошибка».
4. Если $\Delta_1 = 0$, то выбирается

$$v_1 = v_k = 3{,}6\ (g R_1 \varphi_1)^{1/2}.$$

Вычисляется $J(t) = S / v_k$

5. Если $\Delta_1 > 0$, то выбирается $v_1 = v_{\max}$.
6. Вычисляем

$$s_1 = (a_u t_1^2)/2,\ t_1 = V_1 / a_u,$$
$$s_4 = (\pi R_1 \psi_1)/180.$$

6.1. Если $\Delta_1 = s1$, т. е. $S = s_1 + s_4$, то $v_1 = v_{\max}$, $v_4 = v_k$,

Вычисляем $J(t) = \dfrac{v_1 - v_0}{a_u} + \pi \dfrac{R_1 \psi_1}{180 v_4}$.

6.2. Если $\Delta_1 > s_1$, т. е. $S > s_1 + s_4$, перейти к пункту 8.

6.3. Если $\Delta_1 < s_1$, т. е. $S < s_1 + s_4$, то STOP «Ошибка».

7. Проверяем $\Delta_2 = \Delta_1 - s_1$, т. е, $\Delta_2 = S - (s_1 + s_4)$
8. Если $\Delta_2 > 0$, т. е. $S > s_1 + s_4$, вычисляем:

$$s_3 = v_2 t_3 - (a_т t_3^2)/2,\ t_3 = (v_2 - v_3)/ a_т,$$

где $v_2 = v_{\max}$, $v_3 = v_k$, $s_2 = S - (s_1 + s_3 + s_4)$.

9. *Проверяем: Если* $|(s_1 + s_2 + s_3 + s_4) - S < \varepsilon$, здесь ε – заранее заданное маленькое число (погрешность), то $v_1 = v_2 = v_{\max}$, $v_3 = v_4 = v_k$, предоставляет минимум функционалу (1). Вычисляем J(t) (время) по формуле (1), в противном случае используем метод деления интервалов пополам.

10. *Обозначим через* $S(v_1)$ функцию $S(v_1) = (s_1 + s_2 + s_3 + s_4) - S$. Нужно найти минимум этой функции.

11. Положим $v^{(1)}_1 = \frac{v_{\max}}{2}$ длина интервала $L_0 = v_{\max} - v_0 = v_{\max}$. Вычислить:

$$S(v_1^{(1)}) = S\left(\frac{v_{\max}}{2}\right).$$

12. Отложим на интервале [0, $v_{\max}$.] точки ($\frac{v_{\max}}{4}$)и ($v_{\max} - \frac{v_{\max}}{4}$). Эти точки и точка ($\frac{v_{\max}}{2}$) делят интервал [0, $v_{\max}$] на четыре равные части. Вычислить:

$$S(\frac{v_{\max}}{4}), S(v_{\max} - \frac{v_{\max}}{4}).$$

13. *Сравниваем* $S(\frac{v_{\max}}{4})$ $S(\frac{v_{\max}}{2})$.

– Если $S(\frac{v_{\max}}{4}) < S(\frac{v_{\max}}{2})$ исключаем интервал $[\frac{v_{\max}}{2}, v_{\max}]$. Средней точкой интервала поиска становится точка $\frac{v_{\max}}{4} = v_1^{(2)}$, перейти к п. 15.

– Если $S(\frac{v_{\max}}{4}) < S(\frac{v_{\max}}{2})$ перейти к п. 14.

14. Сравнить $S(v_{\max} - \frac{v_{\max}}{4}), S(\frac{v_{\max}}{2})$.

– Если $S(v_{\max} - \frac{v_{\max}}{4}) < S(\frac{v_{\max}}{2})$, то исключаем интервал [0, $\frac{v_{\max}}{2}$]. Средней точкой интервала поиска становится точка $S(v_{\max} - \frac{v_{\max}}{4}) = v_1^{(2)}$ – перейти к п. 15.

– Если $S(v_{\max} - \frac{v_{\max}}{4}) \geq S(\frac{v_{\max}}{2})$, исключаем интервалы [0, $\frac{v_{\max}}{4}$] и $[v_{\max}, \frac{v_{\max}}{4}]$. Интервал $[\frac{v_{\max}}{4}, v_{\max} - \frac{v_{\max}}{4}]$ становится новым интервалом поиска минимума, и выбирается новое значение v_1 – перейти к п. 12.

15. Вычислить длины интервала L, где ведется поиск минимума:

– функции $S(v_1)$, если $|L| \leq \varepsilon$, здесь – заранее заданное маленькое число,

-закончить поиск, иначе вернуться к п. 12 и изменять значение v_1

1.3. Метод решения с учетом темперамента водителя

Вводные данные:

– $a_{\text{тх}}$ ($a_{\text{тс}}$, $a_{\text{тм}}$, $a_{\text{тф}}$) – ускорение торможения холерика (сангвиника, меланхолика, флегматика),

– t_{3x} – время прохождения третьего отрезка холериком,

– s_{3x} – пройденный холериком путь на третьем отрезке.

1. Начало. Вычисляем $s_4 = (\pi R_1 \psi_1)/180$.
2. Проверяем $\Delta_1 = S - s_4$.
3. Если $\Delta_1 < 0$, то *S*TOP «Ошибка».
4. Если $\Delta_1 = 0$, то выбираем

$$v_1 = v_k = 3{,}6\ (gR_1\ \varphi_1)^{1/2}.$$

5. Если $\Delta_1 0$, то выбираем $v_1 = v_{\max}$
6. Вычисляем

$$s_1 = (a_u\, t_1^2)/2,\ t_1 = V_1 / a_u,\ s_4 = (\pi R_1\ \psi_1)/180.$$

6.1.Если $\Delta_1 = s_1$, т. е. $S = s_1 + s_4$, то $v_1 = v_k$, $v_4 = v_k$

Вычисляем $J(t) = \frac{v_1 - v_0}{a_u} + \pi \frac{R_1 \psi_1}{180 v_4}$.

6.1. Если $\Delta_1 > s_1$, т. е. $S > s_1 + s_4$, перейти к пункту8.

6.2. Если $\Delta_1 < s_1$, т. е. $S < s_1 + s_4$, то *S*TOP «Ошибка».

7. Проверяем $\Delta_2 = \Delta_1 - s_1$, т. е, $\Delta_2 = S - (s_1 + s_4)$
8. Если $\Delta_2 0$, вычисляем:

$$s_{3x} = v_2\, t_{3x} - (a_{\text{тх}}\, t_{3x}^2)/2,\ t_{3x} = (v_2 - v_3)/\, a_{\text{тх}},$$

где $v_2 =$, $v_3 = s_{2x} = S - (s_1 + s_{3x} + s_4)$

9. *Проверяем. Если* $|(s_1 + s_{2x} + s_{3x} + s_4) - S$, здесь ε – заранее заданное маленькое число (погрешность), то $v_1 = v_2 = v_{\max}$, $v_3 = v_4 = v_k$ предоставляет минимум функционалу (1) (при вычислении заменим a_{T} на a_{TX}), в противном случае используем метод деления интервалов пополам.

10. *Обозначим через* $S(v_1)$ функцию $S(v_1) = (s_1 + s_{2x} + s_{3x} + s_4) - S$. Нужно найти минимум этой функцию.

Дальше, как в первом алгоритме п. 11–15.

Заменяя (п. 8–10), получим аналогично, методы решения для сангвиника, меланхолика, и флегматика.

При этом учитывались следующие ограничения:

– автомобиль не может разогнаться до скорости больше допустимой по условиям дорожного движения;

– максимальное ускорение при разгоне определяется техническими параметрами автомобиля и вычисляется из условия времени разгона до заданной скорости;

– при учете темперамента оценка ускорения при разгоне изменяется с учетом времени реакции водителя холерика либо времени реакции водителя сангвиника, либо времени реакции водителя меланхолика, либо времени реакции водителя флегматика, а также времени выдачи команды роботом-штурманом для водителя холерика, сангвиника, меланхолика или флегматика;

– скорость при повороте для предотвращения аварии не может быть больше критической;

– максимальное ускорение при торможении определяется техническими параметрами автомобиля и дорожными условиями и вычисляется из условия времени торможения от начальной скорости до нуля при торможении и из тормозного пути, зависящего от дорожных условий;

– при учете темперамента оценка ускорения при торможении изменяется с учетом времени реакции водителя холерика, либо времени реакции водителя сангвиника, либо времени реакции водителя меланхолика, либо времени реакции водителя флегматика, а также времени выдачи команды роботом-штурманом для водителя холерика, сангвиника, меланхолика или флегматика.

Заключение

Результаты компьютерного моделирования предложенного метода показали, что время прохождения трассы зависит от темперамента водителя, и они разные для водителя холерика, сангвиника, меланхолика, флегматика.

Перспективным является учет рекомендации роботом-штурманом (интеллектуальным роботом) темперамента водителя при выдаче рекомендаций по разгону и торможению автомобиля для водителя. Потому, что учет темперамента на принятие решения роботом при взаимодействии с человеком позволяет улучшать качество взаимодействия и избегать коллизий.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания по контракту № 124041500008-1.

Библиографический список

1. https://euromednews.ru/2013/03/roboty-na-sluzhbe-u-bolnykh-i-pozhilykh-lyudejj/

2. *Madrigal A. C.* Meet the Cute, Waffles-Wearing, Wikipedia-Reading Robot That's Going to Hitchhike Across Canada (англ.), The Atlantic (12 June 2014).

3. *Нечет Т.* Вандалы поломали и обезглавили знаменитого робота-путешественника HitchBOT // Комсомольская правда (3 августа 2015 г.).

4. Психологические тесты для профессионалов / авт. сост. Н. Ф. Гребень. Минск: Соврем. шк., 2007. 496 с

5. *Русалов В. М.* Опросник структуры темперамента (ОСТ). М.: ИП АН СССР, 1990. 50 с.

6. *Менделевич В. Д.* Клиническая и медицинская психология: учеб. пособие. МЕДпресс-информ, 2008. 432 с.

7. Роль темперамента в деятельности водителя / К. Д. Трубникова [и др.] // Современные научные исследования и инновации. 2018. № 1. URL: https://web.snauka.ru/issues/2018/01/85383 (дата обращения: 02.06.2023).

8. *Ефремов Б. Д., Оверин Ю. В.* Методы оценки профессиональных качеств водителей автомобилей // Технико-технологические проблемы сервиса. 2011. № 16. Т. 2.

9. *Крамарова М. И.* Роль темперамента водителя в обеспечении безопасности дорожного движения // Технологический аудит и резервы производства. 2012. № 1(7). Т. 5.

10. Влияние темперамента на стиль вождения. URL: http://autopsiholog. ru/12655 (дата обращения: 16.12.2024).

УДК 681.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-170-174**

А. Ю. Кучмин*
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник
С. С. Расова*
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
** Институт проблем машиноведения Российской академии наук*

ПРОБЛЕМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ С ЛИНЕЙНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ В СЛУЧАЕ ПУСТОЙ ОБЛАСТИ ДОПУСТИМЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ СИНТЕЗЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В статье рассмотрены вопросы решения задач оптимизации с линейными ограничениями в случае, когда область допустимых решений может быть вырожденной, и заранее это не известно. Подобные задачи возникают в случаях синтеза и идентификации систем управления, поэтому решение данных задач является актуальной проблемой. Предлагается два метода решения подобной задачи. Первый метод называется метод единственно решения, основная идея которого заключается в модификации ограничений путем сдвига на постоянную величину. Сдвиг ограничений формируется таким образом, чтобы получить единственное решение, учитывая тот факт, что перемещение ограничений должно быть минимальным с учетом веса каждого ограничения. Второй метод основан на использовании штрафных функций от ограничений, что позволяет совершить переход от задачи условной оптимизации к задаче безусловной оптимизации, которую предлагается решать стандартными методами.
Ключевые слова: *оптимальное управление, условная оптимизации, штрафные функции.*

A. Yu. Kuchmin*
Dr. Sc., Tech., Leading Research Employee
S. S. Rasova*
PhD, Phys.-Math., Senior Research Employee
**Institute for Problems in Mechanical Engineering of Russian Academy of Sciences*

PROBLEMS OF SOLVING OPTIMIZATION PROBLEMS WITH LINEAR CONSTRAINTS IN THE CASE OF AN EMPTY FEASIBLE SOLUTION DOMAIN IN THE SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEMS

The article considers the issues of solving optimization problems with linear constraints in the case when the feasible solution domain can be degenerate, and this is not known in advance. Such problems arise in cases of synthesis and identification of control systems, so solving these problems is an actual problem. Two methods for solving such a problem are proposed. The first method is called the unique solution method, the main idea of which is to modify the constraints by shifting them by a constant value. The shift of the constraints is formed in such a way as to obtain a unique solution, taking into account the fact that the displacement of the constraints should be minimal given the weight of each constraint. The second method is based on the use of penalty functions from the constraints, which allows for the transition from a conditional optimization problem to an unconditional optimization problem, which is proposed to be solved by standard methods.
Keywords: *optimal control, conditional optimization, penalty functions.*

Введение

При решении практических задач в технических системах все чаще используются подходы, основанные на идеях условной оптимизации при большом количестве ограничений различного вида [1–5]. В задачах синтеза технических систем требования к параметрам и характеристикам обычно задаются в виде ограничений, которые часто носят противоречивый характер, например, требуется обеспечить высокое быстродействие при низком потреблении энергии и т. д. При решении задача идентификации динамических систем может быть сведена к задаче математического программирования [1, 2], где модель динамической системы может описываться системой ограничений в виде неравенств. Из-за того, что модель системы часто носит упрощенный характер и не полностью отражает ее поведение, что обусловле-

но наличием шумов и влиянием внешних воздействий, система неравенств, описывающая модель, может быть противоречивой, а ее решение – пустым множеством.

Эффективным способом решения задач оптимизации с произвольными ограничениями является разбиение исходной задачи на последовательность задач с линейными ограничениями [6, 7]. Целевая функция над данной областью может быть аппроксимирована квадратичной формой. При дальнейшем решении этой последовательности задач из-за ошибок аппроксимации области допустимых решений могут оказаться вырожденными, хотя исходная задача может иметь решение. Поэтому разработка методов коррекции областей допустимых решений, образованных линейными ограничениями в результате аппроксимации, является актуальной.

Постановка задачи для метода единственного решения

Многие задачи проектирования систем управления могут быть сведены к задачам оптимизации с линейными ограничениями [5, 8, 9]. На практике системы управления представляют собой нелинейные системы, параметры которых могут меняться случайным образом, что приводит к тому, что модели с линейными ограничениями описывают их с определенной погрешностью, что приводит к вырождению области допустимых значений. Для применения методов оптимизации с линейными ограничениями для моделирования и синтеза подобных систем параметры ограничений задаются на стадии проектирования и не отслеживают изменения реальных параметров системы управления. Одним из путей преодоления подобной коллизии является введение понятия нежестких ограничений, которые учитывают погрешности и неточности моделей. Наиболее простой вариант задания таких ограничений – это возможность смещать их в ходе решения задачи синтеза системы управления в допустимых пределах.

Задана целевая функция $\Phi_{\mathbf{x}}$ при системе ограничений $\mathbf{G}(\mathbf{x})\geq 0$. Нужно решить задачу минимизации целевой функции над областью, которую задает система неравенств $\mathbf{G}(\mathbf{x})\geq 0$. Система ограничений формируется в качестве модели объекта управления и в дальнейшем аппроксимируется системой линейных ограничений, что является стандартным подходом при решении подобного рода задач. Идеальная нелинейная модель $\mathbf{G}(\mathbf{x})\geq 0$ имеет довольно узкую область допустимых решений. При аппроксимации системой линейных ограничений эта область искажается и может стать вырожденной. К сожалению, дать ответ, является область вырожденной или нет, можно только при решении задачи. Модель $\mathbf{G}(\mathbf{x})\geq 0$ зачастую не имеет математического описания в явном виде. Исходная целевая функция аппроксимируется квадратичной формой, и эта квадратичная форма минимизируется над областью из линейных ограничений. Необходимо получить такое решение новой задачи, чтобы ее решение с определенной точностью совпадало с решением исходной задачи.

В случае если область допустимых решений модифицированной задачи не является вырожденной, то решение находится классическими методами, например, методом Вульфа. Если область является вырожденной, то предлагается следующий метод решения задачи. Ситуация может развиваться двумя направлениями. Анализируются ограничения и смещаются согласно их приоритетам, которые задаются на стадии проектирования, чтобы получить непустую область допустимых решений. А потом значения целевой функции вычисляются в данной точке. Второй вариант – это сдвиг ограничений с учетом изменений целевой функции.

Рассмотрим систему линейных ограничений

$$g_i(\mathbf{x}) = \mathbf{A}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{x} + b_i \geq 0,\ i = 1,\ldots,m, \qquad (1)$$

заданных в алгебраическом виде. Здесь $\mathbf{A}_i$ – вектор параметров ограничений, $\mathbf{x}$ – вектор варьируемых переменных размерности n, b_i – смещение ограничения. Количество ограничений во много раз больше числа варьируемых переменных. Предполагается, что область допустимых решений вырожденная. Эта ситуация довольно часто возникает на практике из-за противоречивости требований, предъявляемых к системе управления, которая описывается соотношениями (1). Исходя из описания (1), сложно сделать вывод, какие ограничения приводят к вырождению области допустимых значений. Необходимо разработать процедуру коррекции области допустимых решений (1) таким образом, чтобы эта область перестала быть вырожденной. Самый простой способ сделать это – подвинуть нежесткие ограничения, исходя из их приоритета и минимизируя функцию штрафов за перемещение ограничений. Для каждого ограничения из (1) введем весовой коэффициент штрафа w_i в диапазоне [0, 1], где 0 будет означать, что ограничение можно исключить из рассмотрения, а 1 – жесткие ограничения, име-

ющие максимальный приоритет. Определим функцию штрафа за перемещение ограничений в виде:

$$\Phi_\lambda = \frac{1}{2}\sum_i \lambda_i^2 w_i, \qquad (1^*)$$

где λ_i – перемещение ограничения. Перепишем (1) в виде:

$$g_i^*(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{A}_i^{\mathrm{T}}}{|\mathbf{A}_i|}\mathbf{x} + \frac{b_i}{|\mathbf{A}_i|} = \mathbf{e}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{x} + \frac{b_i}{|\mathbf{A}_i|} \geq 0,$$

$$i = 1,\ldots,m, \quad \mathbf{e}_i = \frac{\mathbf{A}_i}{|\mathbf{A}_i|}. \qquad (2)$$

Наша задача заключается в том, чтобы сдвинуть ограничения таким образом, чтобы область допустимых решений содержала хотя бы одну точку. Данный метод будем называть методом единственного решения, который заключается в том, что точка области допустимых решений должна принадлежать всем гиперплоскостям ограничений в (2). Поэтому путем добавления переменной λ_i осуществим переход от системы неравенств (2) к системе уравнений:

$$g_i^{**}(\mathbf{x}) = \mathbf{e}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{x} + \frac{b_i}{|\mathbf{A}_i|} + \lambda_i = 0,\ i = 1,\ldots,m. \qquad (3)$$

Система уравнений (3) позволяет выразить λ_i и подставить их в выражение для функции штрафа:

$$\lambda_i = -\mathbf{e}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{x} - \frac{b_i}{|\mathbf{A}_i|},\ i = 1,\ldots,m.$$

Сдвиг ограничений осуществляется таким образом, чтобы минимизировать функцию штрафа, в которой весовые коэффициенты задаются на стадии проектирования. Решим задачу поиска минимума функции штрафа $J = \min\Phi_\lambda$. Для этого найдем градиент функции Φ_λ и приравняем его к нулю:

$$\nabla_{\mathbf{x}}\Phi_\lambda = 0, \quad \frac{\partial\Phi_\lambda}{\partial x_j} = \left[\sum_i e_{i,j}\mathbf{e}_i^{\mathrm{T}} w_i\right]\mathbf{x} +$$

$$+\left[\sum_i e_{i,j}\frac{b_i}{|\mathbf{A}_i|}w_i\right] = 0,\ j = 1,\ldots,n,\ \ i = 1,\ldots,m. \qquad (4)$$

Решив систему уравнений (4), найдем $\mathbf{x}_0$. В системе уравнений (4) матрица при $\mathbf{x}$ может быть вырожденной для случая, когда возникают несколько точек в скорректированной области допустимых решений.

На практике при нахождении $\mathbf{x}_0$ необходимо учитывать изменение целевой функции $\Phi_{\mathbf{x}}$. Часто в пределах небольшой области допустимых решений исходная целевая функция может быть аппроксимирована квадратичной формой вида:

$$\Phi_{\mathbf{x}} = \frac{1}{2}\mathbf{x}^{\mathrm{T}}\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{f}\mathbf{x} + c,$$

где $\mathbf{H}$ – матрица параметров целевой функции, $\mathbf{f}$ – вектор-строка параметров целевой функции, c – константа. Составим модифицированную целевую функцию $\Phi = \Phi_{\mathbf{x}} + \Phi_\lambda$ и решим задачу минимизации:

$$J^* = \min_{\mathbf{x}}\Phi. \qquad (5)$$

Для этого найдем градиент функции Φ по переменным $\mathbf{x}$ и приравняем его нулю: $\nabla_{\mathbf{x}}\Phi = 0$. . Получаем систему уравнений:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial x_j} = \left[\mathbf{h}_j + \sum_i e_{i,j}\mathbf{e}_i^{\mathrm{T}} w_i\right]\mathbf{x} +$$

$$+\left[f_j + \sum_i e_{i,j}\frac{b_i}{|\mathbf{A}_i|}w_i\right] = 0,$$

$$j = 1,\ldots,n, \quad i = 1,\ldots,m. \qquad (6)$$

$\mathbf{h}_j$ – j-я строка матрицы $\mathbf{H}$.

После решения системы уравнений (6) будет найдено оптимальное значение $\mathbf{x}$.

Модификация метода единственного решения с помощью штрафных функций

Следует отметить, что существует два процесса при перемещении ограничений типа неравенства, а именно: ужесточение и ослабление ограничений. Ужесточение ограничений в системе обладает меньшим вкладом в функцию Φ_λ, чем ослабление ограничений. Это должно быть учтено при решении задачи. Предлагается рассчитывать весовые коэффициенты для текущего значения $\mathbf{x}$ по следующей формуле:

$$w_i = w_{0,i}\exp(\beta\lambda_i). \qquad (7)$$

Таким образом, задача (5) может быть решена с помощью итерационной процедуры, где $\mathbf{x}$ находится в результате решения системы уравнений (6), где на каждой итерации алгоритма меняются весовые коэффициенты. После получения текущего значения $\mathbf{x}$ смотрится выполнение ограничений, и рассчитываются новые весовые коэффициенты по формуле (7). Определение качества решения может выполняться согласно оценочной функции $\Phi_\lambda^* = \sum_i w_{0,i}\exp(\beta\lambda_i)\lambda_i^2$, где могут учитываться

все ограничения задачи, а могут учитываться только те ограничения, которые не выполняются. Следует отметить, что какой из вариантов будет более эффективным, зависит от конкретной задачи. В качестве оптимального решения будет выбираться то, которое соответствует минимуму оценочной функции, полученному за N итераций. Выбор числа N может осуществляться по следующей методике. Если величина оценочной функции при N стремится к некоторому установившемуся значению, то, соответственно, может быть выбрано это N как этап завершения поисковой процедуры.

Алгоритм

1. Введение параметров ограничений и целевой функции исходной задачи.

2. Ввод весовых коэффициентов ограничений и количества итераций алгоритма.

3. Согласно формуле (6) формируется система уравнений.

4. Находится ранг матрицы $\left[\mathbf{h}_j + \sum e_{i,j}\mathbf{e}_i^{\mathrm{T}} w_i\right]$. Если матрица невырожденная, то i находится значение x как решение системы уравнений (6). Если матрица вырожденная, то имеется несколько решений. Соответственно задача будет решаться методом псевдообращения матрицы.

5. Проверяется выполнение ограничений исходной системы. По формуле (7) рассчитываются новые значения весовых коэффициентов ограничений и рассчитывается значение функции штрафа согласно формуле $\Phi_\lambda^* = \sum w_{0,i} \exp(\beta\lambda_i)\lambda_i^2$, (первый вариант – учитываются только не выполняющиеся ограничения, второй вариант – учитываются все ограничения). Осуществляется переход в пункт 3, если не превышено количество итераций алгоритма. Если количество итераций превышено, то из рассчитанных значений для **x** и λ выбираются те, которые соответствуют минимуму штрафной функции для всех итераций.

6. Вывод **x** и уточненной системы ограничений с учетом смещения ограничений λ.

Метод штрафных функций

Предлагаемый в предыдущем разделе алгоритм обладает простой процедурой поиска решений некорректных задач и может быть легко запрограммирован. Но наряду с этим не учитывает изменение весовых коэффициентов, которые зависят от сдвига ограничений, что может привести к неустойчивости его работы. Для того чтобы разрешить данную проблему можно модифицировать целевую функцию, учитывая зависимость весовых коэффициентов от смещения ограничений. Это может быть сделано с помощью метода штрафных функций [5,] двумя способами. Первый способ может быть сформулирован как $\Phi_\lambda^* = \sum_i w_{0,i} \exp(\beta\lambda_i)\lambda_i^2$, а второй – $\Phi_\lambda^{**} = \sum_i w_{0,i} \exp(\beta\lambda_i)$, Новая целевая функция имеет трансцендентный вид: $\Phi = \Phi_{\mathbf{x}} + \Phi_\lambda^*$ или $\Phi = \Phi_{\mathbf{x}} + \Phi_\lambda^{**}$, но является гладкой. Исходя из идеи единственности решения, для нахождения оптимального **x** могут быть использованы градиентные методы поиска. После нахождения оптимального **x** проверяется выполнение ограничений. Те ограничения, которые выполняются, не меняются, а те ограничения, которые не выполняются, ослабляются согласно найденным λ_i.

Заключение

В статье рассмотрены вопросы решения задач условной оптимизации с линейными ограничениями, которые возникают при синтезе и идентификации систем управления в случае, когда область допустимых решений может быть пустой. Предлагаются два метода решения данной актуальной задачи. Первый – это метод единственного решения, заключающийся в том, чтобы модифицировать ограничения, формирующие область допустимых решений, таким образом, чтобы было хотя бы одно решение. Модификация ограничений осуществляется их сдвигом при минимизации этих перемещений с учетом их приоритета. Также предлагается учитывать направления уменьшения целевой функции при сдвиге ограничений. Второй – это использование классического метода штрафных функций и переход от задачи условной оптимизации к задаче безусловной оптимизации, которая может быть решена с помощью классических градиентных методов. Метод единственного решения имеет простую вычислительную процедуру и может быть легко реализован средствами вычислительной техники. Его модификации позволяют учитывать тот факт, что ужесточение и ослабление ограничений вносит различный вклад при решении задачи.

Благодарности

Работа поддержана Минобрнауки Российской Федерации (проект госзадания 124041500008-1).

Библиографический список

1. *Kuchmin A. Y.* Creation of Databases and Formalization of Knowledge Using Identification of SEMS, Working Under Various Constrains // Tarasova I. L., Kulik B.A. (eds) Smart Electromechanical Systems. Studies in Systems, Decision and Control, vol 544. Springer, 2024. Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-64277-7_5.

2. *Kuchmin A. Y.* Identification of the SEMS Module Using the Example of a Model of a Linear Electric Drive of a Counter-Reflector Actuator Taking into Account Constrains // Tarasova I. L., Kulik B.A. (eds) Smart Electromechanical Systems. Studies in Systems, Decision and Control, vol 544. Springer, 2024. Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-64277-7_12.

3. *Kuchmin A. Y.* Group Interaction of SEMS Modules at Control of an Adaptive Surface of the Main Dish, Smart Electromechanical Systems. Group Interaction. Editors: Gorodetskiy A. E., Tarasova I. L. (Eds.) Springer Nature Switzerland AG, 2018. P. 183–192. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99759-9_15

4. *Kuchmin A. Y.* Synthesis of Optimal Program Control for Synchronizing the Movements of a Group of SEMS Modules, Smart Electromechanical Systems Behavioral Decision Making, Editors: Gorodetskiy A. E., Tarasova I. L. (Eds.), Springer Nature Switzerland AG, 2021. P. 81–94.

5. *Табак Д., Куо Б.* Оптимальное управление и математическое программирование / Пер. с англ. Серия: Теоретические основы технической кибернетики. М.: Наука, 1975. 280 с.

6. *Кучмин А. Ю.* Об одном методе нелинейного программирования с произвольными ограничениями // Информационно-управляющие системы. 2016. Т. 81. № 2. С. 2–10.

7. *Кучмин А. Ю.* Анализ полиномиальных ограничений методом дерева решений // Информационно-управляющие системы. 2017. № 6(91). С. 9–14.

8. *Немировский А. С., Юдин Д. Б.* Эффективные методы решения задач выпуклого программирования большой размерности // Экономика и математические методы. 1979. № 2. С. 135–152.

9. *Юдин Д. Б., Гольштейн Е. Г.* Линейное программирование. Теория, методы и приложения. 2-е изд. М.: УРСС, 2012. 424 с.

10. *Зангвилл У. И.* Нелинейное программирование. Единый подход / Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1973. 312 с.

УДК 378.147 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-175-178**

В. В. Малкова*
лаборант
Ф. Ф. Хабибуллин*
кандидат технических наук, доцент
Л. Ф. Хабибуллина*
аспирант
**Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева*

О МЕТОДАХ ОБРАЗОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ

В статье рассмотрены подходы к созданию и исследованию пространственных механизмов сложной структуры. Отмечено, что первоначальная разработка механизмов основывалась на математических расчетах и геометрических построениях, подтверждаемых экспериментальными моделями. Рассмотрена перспектива значимых изобретений, таких как механизм Робервaля, ставший основой высокоточных весов, а также механизмов Беннетта, Брикара, Деласью и Херве, созданных аналитическим путем.
Ключевые слова: *сложный механизм, шестизвенник, математическое моделирование, аналитическое моделирование.*

V. V. Malkova*
Laboratory Assistant
F. F. Khabibullin*
PhD, Tech., Associate Professor
L. F. Khabibullina*
PhD Student
**Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev*

ON METHODS OF CREATING COMPLEX STRUCTURE MECHANISMS

The article considers approaches to creating and studying spatial mechanisms of complex structure. It is noted that the initial development of mechanisms was based on mathematical calculations and geometric constructions confirmed by experimental models. The prospects of significant inventions, such as the Roberval mechanism, which became the basis for high-precision scales, as well as the Bennett, Bricard, Delasieu and Herve mechanisms created analytically, are considered.
Keywords: *complex mechanism, six-link, mathematical modeling, analytical modeling.*

На начальном пути развития сложных механизмов основными методами их образования были математические расчеты и геометрические построения, которые позволяли на опытных образцах определить жесткость механизма и из этого сделать вывод об его соответствие поставленной задаче. Методы создания опытных образцов – лучший способ исследования и анализа новых структур, так как с помощью этих образцов можно отследить поведение механизма, понять суть его работы и сделать выводы по его применимости в разных сферах.

Так, в 1666 г. французский математик Ж. Робервaль изобрел сложный механизм особой структуры (рис. 1), который на сегодняшний день является одним из самых популярных, путем создания опытных образцов. Именно на изобретенном варианте научный деятель смог понять принцип работы и возможности механизма, после чего нашел сферу для его использования. Главным фактором, изученном на опытном образце, было то, что на показания созданного механизма не оказывало влияние положение груза, расположенного на весовой чаше.

Абсолютно аналогично были созданы и проверены опытным путем такие распространенные механизмы сложной структуры, как механизмы Беннетта, Брикара, Деласью, Херве. Важно отметить, что методы, перечисленные ранее, использовались не только на начальном этапе, но и актуальны на сегодняшний день. Так, Диетмайер, который в 1995 г. воплотил в жизнь одноподвижный шестизвенный механизм, смог на основе опытного образца описать математическую зависимость между длинами звеньев и углами скрещивания осей шарниров подобных механизмов. Из всего

Рис. 1. Весы Робервaля, опытный образец и созданный по нему инструмент

сказанного можно однозначно сделать вывод, что перечисленные ранее механизмы были получены аналитическим методом. Все это говорит о том, что из-за малой степени исследования подобных механизмов и их непредсказуемости абсолютно обоснованным будет метод первоначальной математической модели, которая позволит судить о возможность существования этих механизмов. Уже после теоретического подтверждения становится возможным создание опытных моделей для подтверждения или опровержения ранее выдвинутой математической теории.

Изобретение новых видов механизмов требует от человека творческого подхода, который позволит предположить, что получится при скрещивания базовых, простых видов пространственных механизмов, сумма которых откроет новый сложный механизм. Однако у этого метода есть свои недостатки, ведь по понятным причинам, творческий и экспериментальный подходы не могут точно показать, каким будет результат, и не могут быть подкреплены определенным алгоритмом действий, которые приведут к созданию нового вида работающего сложного механизма. Но при этом данные способы самые результативные в плане образования новых видов пространственных механизмов.

Подробнее про метод, который был упомянут ранее, – метод образования механизмов с избыточными связями путем соединения простых, базовых механизмов. Поговорим поподробнее про принцип действия этого способа создания механизмов на примере образования нового пространственного шестизвенного механизма, который образован путем объединения уже известных, как представлено на рис. 2. Сферический механизм ABCDO был соединен с плоским механизмом FEDO путем совмещения по общему звену DO. Важно отметить, что звено DO является избыточным и может быть вовсе исключено из механизма, что никак не повлияет на подвижность и работу механизма, но создаст новую модификацию [1].

Оси шарниров комбинированного звена 6 (аналогично и звена 3) либо перекрещиваются, либо пересекаются. По своим свойствам новый механизм не отличается от тех, из которых он состоит, но при этом, на опыте доказано, что он имеет недостаточную жесткость.

Этим же способом могут быть объединены иные виды механизмов, например, два плоских, либо два сферических, что без сомнений приведет к образованию новых, более сложных механизмов с интересной структурой и поведением. В 1853 г. французский математик Саррюс создал шестизвенный пространственный механизм, объединив два плоских механизма. Этот механизм преобразовывал ограниченное движение по окружности в прямолинейное без использования направляющих. Позднее объединение нескольких механизмов Беннетта дало возможность создавать новые подвижные механизмы особой структуры, среди которых механизмы Голдберга, Муара, Волхарта, Мавроди, Бейкера и др. Этот метод объединения стал основой для разработки многозвенных складыва-

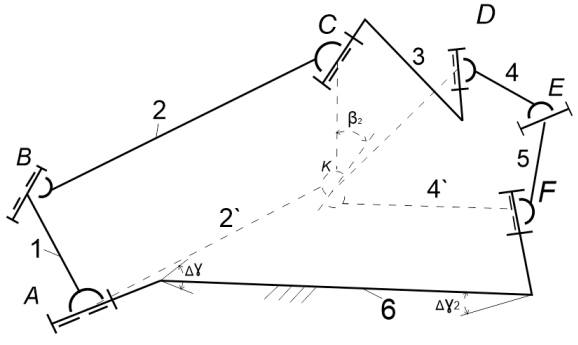


Рис. 2. Образование шестизвенного механизма сложной структуры путем объединения плоского и сферического механизмов

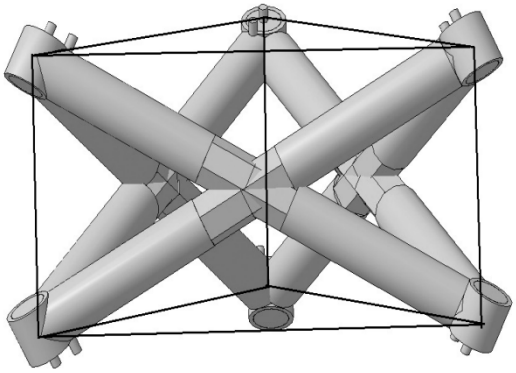


Рис. 3. Механизм Брикара

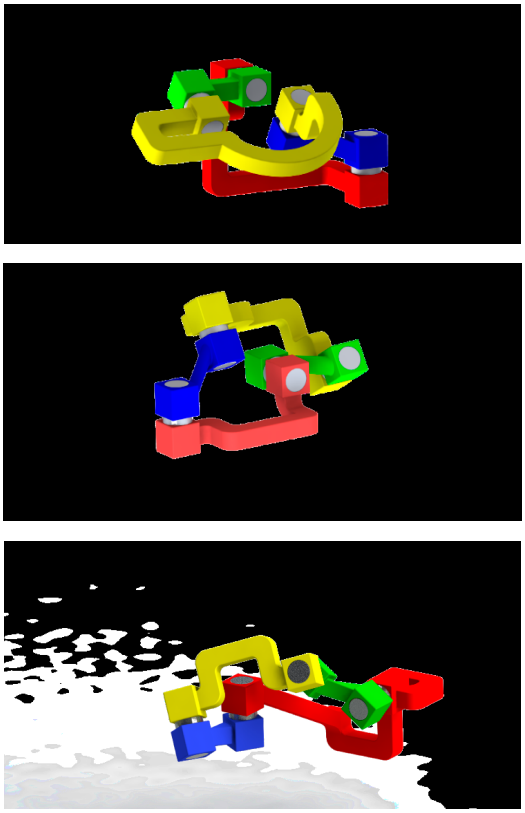


Рис. 4. Модификации шестизвенных механизмов

ющихся механизмов. Например, механизм Волхарта был получен путем объединения нескольких механизмов Саррюса. Аналогичный подход применим и для механизмов, включающих винтовые и поступательные кинематические пары: так, Ли и Херве создали новый механизм, объединив несколько механизмов Деласью.

Третий подход к созданию сложных механизмов заключается в их модификации. Под модификацией понимается изменение взаимного расположения осей шарниров механизма в соответствии с определенным правилом, при котором структура и количество звеньев остаются неизменными (пример показан на рис. 3).

Рассмотрим этот метод на примере модификации механизма Брикара. Исходным механизмом была трехгранная призма, в которой звенья расположены по диагоналям боковых граней. Без учета признаков структурной симметрии все возможные модификации механизма Брикара выглядят одинаковыми, однако при детальном анализе они оказываются существенно различными. Учет симметрии позволяет выявить новые варианты механизмов и установить взаимосвязи между ними. Метод модификации также позволил получить новые шестизвенные механизмы Турбула и Альтмана, которые, в том числе, можно рассматривать в качестве модификаций механизма Брикара.

На основе анализа проведенных методов образования механизмов сложной структуры был разработан метод проектирования пространственных механизмов особой структуры, которая включает условия образования механизмов сложной структуры. Полученные модификации представлены на рис. 4 [2].

Анализ полученных модификаций механизмов и методов образования механизмов сложной структуры показал, что для проектирования мехатронных и робототехнических систем необходимо применять метод соединения разных механизмов при необходимости получения определенной траектории движения исполнительного устройства. А для позиционирования объектов или передачи вращательного движения необходимо соединять базовые механизмы одинакового типа, например, соединить две модификации механизма Беннетта типа параллелограмм или с типом антипараллелограмм механизма Беннетта [3, 4].

Были выделены основные методы синтеза одноподвижных механизмов особой структуры. Они включают синтез на основе математических расчетов и геометрических построений, объединение нескольких базовых механизмов, а также модификацию существующих механизмов путем изменения взаимного расположения осей их шарниров.

Библиографический список

1. *Вопилкин Е. А.* Расчет и конструирование точных механизмов. 1966. 259 с.

2. *Мудров П. Г.* Пространственные механизмы с вращением. 1976. 257 с.

3. *Хабибуллина Л. Ф., Исламов Р. Т., Фаизов М. Р.* Классификация механизмов особой структуры, применяемых как базовый в робототехнической системе // Профессиональные коммуникации в научной среде – фактор обеспечения качества исследований. Материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции. СПб., 2024. С. 491–495.

4. *Фаизов М. Р., Хабибуллина Л. Ф., Хабибуллин Ф. Ф.* Синтез по степени неравномерности вращения ведомого звена пространственного механизма // Современное машиностроение. Наука и образование. 2024. № 13. С. 189–202.

УДК 65.011.56 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-179-184**

А. Б. Морозов*
аспирант
А. А. Безгодов*
кандидат военных наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СОВРЕМЕННАЯ СКЛАДСКАЯ ЛОГИСТИКА: ВНЕДРЕНИЕ RFID-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ

RFID (Radio Frequency Identification) – технология, которая играет важную роль в текущей и будущей автоматизации процессов в различных отраслях. Она позволяет эффективно управлять позициями на складе, а также обеспечивать безопасность и достоверность ведения учета. RFID-технология помогает сократить затраты, время и минимизирует ошибки при отслеживании и идентификации объектов. Эта технология также повышает скорость и точность процессов, что приводит к повышению эффективности и качества обслуживания для клиентов. RFID-технология имеет потенциал для дальнейшего развития и интеграции с другими технологиями, такими как Интернет вещей и искусственный интеллект, в интересах создания еще более «умных» и автоматизированных решений.
Ключевые слова: *Radio Frequency Identification, идентификация, склад, управление цепями поставок.*

A. B. Morozov*
PhD Student
A. A. Bezgodov*
PhD, Military, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

MODERN WAREHOUSE LOGISTICS: THE INTRODUCTION OF RFID-TECHNOLOGIES TO IMPROVE EFFICIENCY

RFID (Radio Frequency Identification) – technology plays a crucial role in the current and future automation of processes across various industries. It allows for efficient management of warehouse inventory, ensuring security and accuracy in record-keeping. RFID-technology helps reduce costs, time, and minimizes errors in tracking and identifying items. This technology also increases the speed and accuracy of processes, leading to improved efficiency and customer service quality. RFID-technology has the potential for further development and integration with other technologies, such as the Internet of Things and Artificial Intelligence, to create even more intelligent and automated solutions.
Keywords: *Radio Frequency Identification, identification, warehouse, Supply Chain Management.*

Эффективное управление складом напрямую зависит от продуманной организации хранения инвентарной позиции. Правильное размещение продукции ускоряет поиск, упрощает приемку новых партий, и оптимизирует логистику. Оптимизация складской логистики включает в себя несколько направлений: оптимизацию площади, процессов, систем адресного хранения, автоматизации и использование технологий автоматической идентификации.

В данной статье рассмотрим автоматизацию складского учета, началом которой является надежная идентификация каждой товарной позиции. Точная информация о товаре оптимизирует приемку, хранение, отгрузку и инвентаризацию.

Идентификация товара может осуществляться несколькими способами:

1. Штрихкодирование: наиболее распространенный метод, использующий сканируемые штрихкоды для быстрого и точного определения товара.

2. Ручная идентификация: применение этикеток, маркировки и других способов ручной идентификации с указанием необходимой информации о товаре.

3. RFID-метки: использование радиочастотной идентификации для считывания информации с микрочипов, обеспечивающее отслеживание товаров в режиме реального времени на всех этапах производства и логистики.

Идентификация продукции тесно связана с учетом. Учет продукции включает в себя сбор и хранение информации о продукте в различных фазах его жизненного цикла, включая производство, хранение, продажу, приобретение и использование. Идентификация продукции позволяет связывать информацию о продукте с определенным товаром или партией товаров. Это облегчает отслеживание продукции во всей цепочке поставок, а также контроль запасов, определение стоимости и управление производственными процессами.

Эффективные складские процессы, включающие планирование, приемку, хранение, комплектацию, отгрузку, инвентаризацию и управление запасами, являются неотъемлемой частью успешной работы склада. Они охватывают весь жизненный цикл товара, от поступления до доставки клиенту, минимизируя затраты и обеспечивая своевременную доставку. Оптимизированные складские процессы – ключ к эффективности всей логистической цепочки.

Повышение эффективности складской логистики с помощью технологий автоматической идентификации имеет множество преимуществ. Вот некоторые из них:

1. Увеличение скорости приемки и отгрузки товаров. Автоматическая идентификация позволяет быстро и точно идентифицировать товары, что упрощает и ускоряет процесс их перемещения на складе.

2. Сокращение времени инвентаризации. Автоматическая идентификация позволяет быстро считывать штрих-коды или RFID-метки на товарах, что сокращает время, затрачиваемое на инвентаризацию, и повышает точность ведения учета.

3. Уменьшение количества ошибок. Технологии автоматической идентификации минимизируют возможность ошибки оператора при обработке идентификационных данных и упрощают процесс отслеживания товаров на складе.

4. Улучшение управления поставками. Технологии автоматической идентификации позволяют автоматически отслеживать поставки и контролировать их количественные и качественные параметры. Это снижает риски пропуска поставок или повышение эффективности управления поставками. Применение технологий автоматической идентификации для отслеживания и контроля количественных и качественных параметров поставок приводит к улучшению показателя своевременности поставок и снижению процента бракованных товаров.

5. Упрощение контроля перемещения товаров. Технологии автоматической идентификации обеспечивают простоту отслеживания пути товаров на складе, способствуя улучшению планирования и оптимизации складских процессов.

Технология RFID

RFID – это технология бесконтактной идентификации объектов посредством радиочастотного считывания метки. Каждый товар оснащается специальной RFID-меткой, которая содержит уникальный идентификатор и другую информацию. Считыватель, размещенный на складе, обнаруживает наличие метки и передает информацию в систему управления складом. На рис. 1 представлена упрощенная схема работы RFID-системы.

Состав RFID-системы:

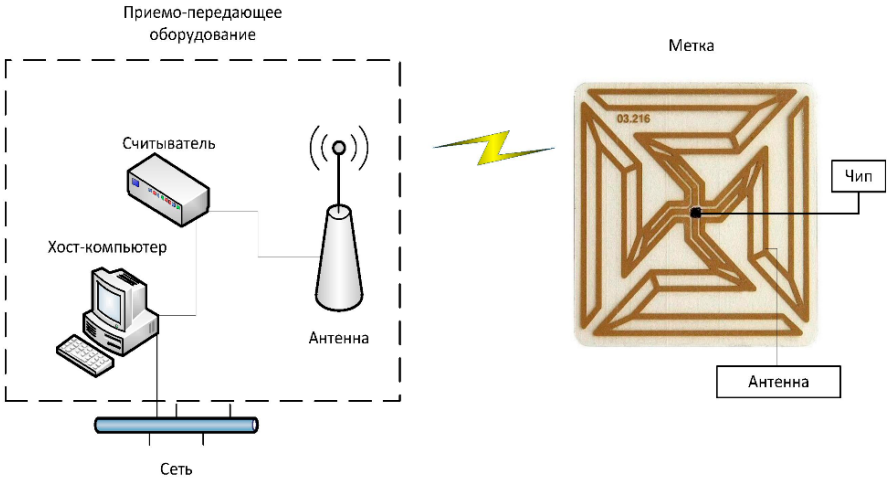


Рис. 1. Пример RFID-системы

Считыватель (ридер): Устройство, передающее радиосигналы для активации меток и считывающее данные с них. Считыватели могут быть стационарными или переносными.

Метка (тег): Небольшой чип, содержащий информацию, и антенна, передающая данные. Метки бывают пассивными (питание получают от считывателя) и активными (имеют собственный источник питания, что позволяет им передавать данные на большее расстояние).

Система обработки данных: Программа или система, которая обрабатывает и анализирует данные, полученные от считывателя.

Классификация RFID-технологий может быть проведена по различным критериям:

1. Диапазон частоты:

a. Низкочастотные (Low Frequency, LF): 30–300 кГц.

b. Высокочастотные (High Frequency, HF): 3–30 МГц.

c. Ультравысокочастотные (Ultra-High Frequency, UHF): 300 МГц – 3 ГГц.

d. Магнитные (Megahertz Frequency, MF): 1–3 МГц.

e. Супергетеродинные (Super High Frequency, SHF): 3–30 ГГц.

2. Тип меток:

a. Пассивные метки, которые работают только при получении энергии от считывателя.

b. Активные метки, которые имеют собственный источник питания и могут передавать данные независимо от считывателя.

c. Полупассивные (или полуактивные) метки, которые имеют собственный источник питания только для передачи данных, но получают энергию от считывателя для приема данных.

3. Размер меток:

a. Крупные метки, использование которых ограничено размером и весом.

b. Маленькие, или микрометки, которые могут быть встроены в устройства, такие как смарт-карты или метки багажа в аэропортах.

4. Применение меток:

a. Считывание в ближнем поле (Near Field Communication – NFC). Это высокочастотное считывание, требующее непосредственной близости метки и ридера (обычно несколько сантиметров).

b. Считывание в дальнем поле. Это низкочастотное или высокочастотное считывание, позволяющее идентифицировать метки на расстоянии от нескольких сантиметров до нескольких метров, а в некоторых случаях и десятков метров.

В отличие от штрихкодирования и ручного учета, системы радиочастотной идентификации (RFID) на складе предлагают ряд значительных преимуществ:

1. RFID-система значительно ускоряет поиск товаров и проведение инвентаризации.

2. RFID-ридеры способны одновременно считывать и корректно идентифицировать сотни, а некоторые модели – до тысячи меток в секунду без искажения данных.

3. RFID-метки способны хранить значительный объем информации (до 512 Кб) и обеспечивают возможность защиты данных с помощью паролей.

4. Информация на RFID-метке может быть перезаписана, что позволяет использовать метку многократно для отслеживания различных товаров.

5. Возможность маркировки каждого элемента партии гарантирует точный учет количества позиций.

6. Система позволяет отслеживать перемещение товаров между различными зонами склада в режиме реального времени.

7. Существует широкий ассортимент RFID-меток, позволяющих подобрать оптимальное решение для любых задач.

К дополнительным преимуществам относятся высокая скорость работы считывателей, различные уровни защиты от подделки (в зависимости от производителя) и устойчивость меток к воздействию окружающей среды.

Однако применение RFID-системы имеет ряд недостатков:

1. RFID-сигналы могут быть подвержены помехам от различных источников, что может приводить к ошибкам считывания.

2. Как и любое программное обеспечение, программное обеспечение RFID-системы может давать сбои, что может приводить к недоступности системы или потере данных.

3. В отличие от штрихкодов, поврежденная RFID-метка, как правило, непригодна для дальнейшего использования.

4. RFID-оборудование, включая считыватели, принтеры для нанесения меток и программное обеспечение, значительно дороже, чем аналогичные устройства для штрихкодирования.

5. Внедрение RFID-системы требует обучения персонала работе с новым оборудованием и программным обеспечением.

RFID-ворота

RFID-ворота (рис. 2) – это системы автоматической идентификации, устанавливаемые на логистических выездах для автоматизированного считывания RFID-меток с грузов. Они

Рис. 2. Пример RFID-ворот

представляют собой конструкцию, оборудованную несколькими UHF-антеннами, обеспечивающими считывание меток с движущихся транспортных средств. Существует несколько типов RFID-ворот, различающихся по техническим характеристикам и функциональности в зависимости от специфических требований конкретного варианта применения:

1. Ворота с одним ридером (считывателем). Такие ворота являются более простыми и недорогими, но могут иметь ограничения в скорости обработки объектов и точности идентификации.

2. Ворота с несколькими ридерами. Данный тип ворот позволяет обрабатывать большее количество объектов одновременно и обеспечивать более высокую точность идентификации.

3. Ворота с различными типами антенн. Различные типы антенн обеспечивают различные зоны покрытия и дальность считывания.

Для обеспечения непрерывной радиовидимости необходимо обеспечить перекрытие зон действия соседних RFID-меток. На рис. 3 показано расположение смежных меток M1 и M2, а также указаны зоны начала и конца радиовидимости каждой метки.

Для корректной работы RFID-ворот предлагается следующий алгоритм (рис. 4).

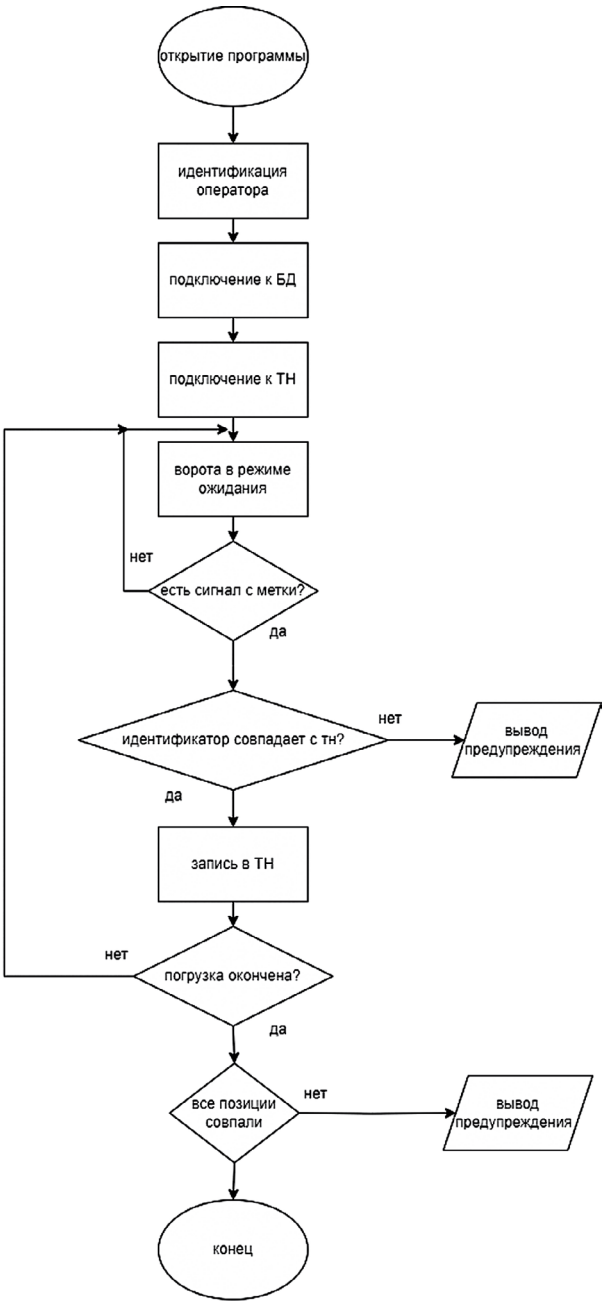


Рис. 4. Диаграмма работы RFID-ворот

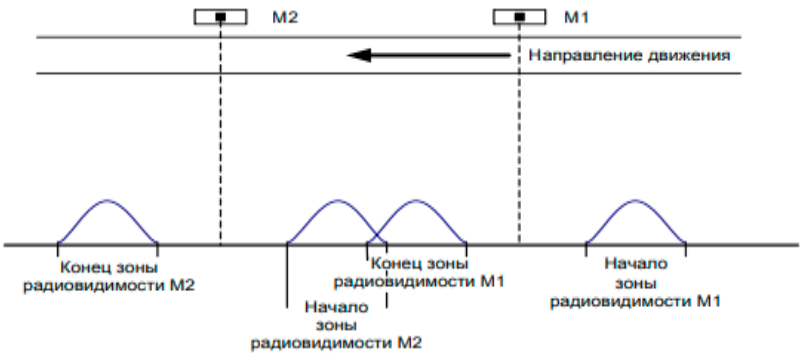


Рис. 3. Зоны начала и конца радиовидимости смежных меток

Предлагаемый алгоритм работы RFID-ворот обеспечивает согласованность процесса логистического перемещения. Система учета формирует список позиций для перемещения, включающий несколько номенклатурных единиц. При проезде через ворота происходит автоматическое сравнение данных RFID-меток на товарах с данными товарно-транспортной накладной. Любое несоответствие (отсутствие позиции из накладной или наличие лишних позиций) вызывает оповещение оператора с помощью световых, звуковых сигналов и/или сообщения на пульте управления. Аналогичное оповещение генерируется в случае недогрузки позиций, выявленной после прохождения ворот.

RFID-ворота обладают следующими преимуществами:

1. Существенно автоматизируют процессы контроля доступа и учета, снижая трудозатраты и минимизируя ошибки, что повышает эффективность и производительность выполнения складских операций.

2. Обеспечивают высокоскоростную обработку большого количества объектов, что критически важно при высоком трафике.

3. Благодаря уникальным идентификаторам RFID-меток гарантируется высокая точность идентификации, снижая вероятность ошибок.

4. Предотвращают несанкционированный доступ и хищения путем отслеживания перемещения объектов и регистрации всех прохождений.

5. Легко интегрируются с WMS (Warehouse Management System), ERP (Enterprise Resource Planning) и системами безопасности, обеспечивая комплексное управление складским комплексом.

6. Автоматически регистрируют прохождение объектов, упрощая учет и предоставляя подробную информацию о движении товаров или персонала.

7. В отличие от оптических систем, RFID-ворота эффективно функционируют в условиях ограниченной видимости, пыли и грязи.

RFID-тележка

RFID-тележка представляет собой мобильное устройство учета, состоящее из RFID-считывателя с модулем Wi-Fi, интегрированного в стандартную тележку, вилочный или гидравлический погрузчик, либо непосредственно в роботизированную платформу (вилочный или платформенный робот-погрузчик (рис. 5). Система осуществляет учет товаров в режиме реального времени, считывая данные с RFID-меток во время движения тележки/погрузчика. Автоматическое отслеживание отгруженных товаров позволяет системе выявлять возможные ошибки и сообщать об этом оператору.

При использовании нескольких роботизированных платформ, можно объединить их в систему «роя». Используя данную систему, можно обеспечить повышение эффективности работы склада: система «рой» позволяет оптимизировать маршруты движения тележек, минимизируя время доставки грузов и увеличивая пропускную способность склада. RFID-технология обеспечивает точный учет и отслеживание товаров на каждом этапе перемещения.

Преимущества системы RFID-тележек:

1. Возможность группового использования: система позволяет использовать несколько RFID-тележек одновременно.

Рис. 5. Роботы платформенного типа

2. Высокая точность идентификации: благодаря близкому контакту считывателя и груза обеспечивается высокая точность идентификации товаров и снижение вероятности ошибок.

3. Интеграция с роботизированными системами: система легко интегрируется в современные роботизированные складские комплексы.

4. Ускорение процессов: значительно сокращает время выполнения задач, связанных с обработкой товаров.

5. Более эффективный контроль: обеспечивает отслеживание перемещения товаров в режиме реального времени.

Недостатки системы, помимо общих недостатков RFID-технологий:

1. Габаритность устройства: RFID-считыватель на тележке имеет относительно большие размеры.

2. Ограничения при обработке мелких товаров: система менее эффективна при учете большого количества мелких товаров, расположенных в несколько слоев.

Заключение

Представленные RFID-технологии – это эффективное средство автоматизации процессов на складах и в других логистических центрах. Несмотря на высокую стоимость внедрения, преимущества в плане повышения эффективности, точности и скорости обработки данных часто перевешивают недостатки. Решение о внедрении RFID-технологий должно основываться на тщательном анализе специфики конкретного предприятия. Необходимо оценить объем обрабатываемых грузов, тип хранимых товаров, существующую инфраструктуру и уровень автоматизации. Ключевым фактором является расчет ROI (Return on Investment) – возврата инвестиций. Для этого следует сравнить предполагаемые затраты на внедрение, включая оборудование, программное обеспечение, интеграцию с существующими системами и обучение персонала, с ожидаемым повышением эффективности и снижением издержек.

Итак, решение о внедрении RFID-технологий должно быть взвешенным и основываться на комплексном анализе всех факторов. Проведение пилотного проекта на ограниченном участке склада может помочь оценить эффективность RFID-системы в конкретных условиях и минимизировать риски. Только после тщательной оценки потенциальных преимуществ и недостатков можно принять обоснованное решение.

Библиографический список

1. *Волгин В.* Склад. Стандарты управления. 2013. С. 435.

2. Comparative study between RFID and barcode identification in warehouses / C. M. Scurtu [et al.] // International journal of engineering technologies and management research. 2018. Vol. 2. P. 120–132.

3. Design and implementation of a barcode-based inventory control system for a warehouse / M. Slam [et al.] // International journal of advanced research in computer science and software engineering. 2016. Vol. 6, № 12. P. 198–200.

4. *Григорьев Н.* Применение RFID-технологии в системах идентификации товаров на складе// Наука техника и образование 2016. № 4 (10). С. 43–49.

5. A RFID case-based logistics resource management system for managing order-picking operations in warehouses / T. C. Poon [et al.] // Expert Systems with Applications 2019. № 36. P. 8277–8301.

6. *Sarac A., Absi N., Dauzère-Pérès S.* A literature review on the impact of RFID technologies on supply chain management // International Journal of Production Economics. 2010. 128. P. 77–95.

7. *Li C. H., He Q.* IEEE, 2009. Design for the logistics storage management system based on RFID, Proceedings of the 3rd International Conference on Anti-Counterfeiting, Security, and Identification in Communication. 215–218.

УДК 004.056 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-185-187**

В. А. Мыльников*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЕЧНЯ ПРАВИЛ МЕЖСЕТЕВЫХ ЭКРАНОВ

В статье рассмотрены вопросы формирования перечня правил для межсетевых экранов на предприятии. Определена структура и архитектура системы, автоматизирующей эти процессы. Разработана модель данных и клиент-серверное приложение. Предлагаемые решения можно использовать при решении вопросов сетевой безопасности.
Ключевые слова: *информационная безопасность, защита информации, автоматизированные системы, межсетевые экраны.*

V. A. Mylnikov*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

AUTOMATED SYSTEM FOR GENERATING A LIST OF FIREWALL RULES

The article examines the issues of generating a list of rules for firewalls at an enterprise. The structure and architecture of the system that automates these processes are defined. A data model and a client-server application are developed. The proposed solutions can be used to solve network security issues.
Keywords: *information security, information protection, automated systems, firewalls.*

На сегодняшний день межсетевые экраны являются неотъемлемой частью системы обеспечения безопасности внешнего периметра любой корпоративной сети или ее внутреннего сегмента, а также обязательным требованием нормативных документов в области информационной безопасности. Межсетевой экран осуществляет контроль и фильтрацию сетевого трафика, и в этом случае актуальной является задача формирования перечня правил такой фильтрации [1]. Грамотно сформированный набор правил фильтрации определяет эффективность работы межсетевого экрана. При этом набор правил должен учитывать особенности предприятия.

В основном при выборе формирования правил фильтрации для межсетевого экрана, опираются на два принципа [2]. В первом случае запрещается все, что явно не разрешено. Во втором же случае будут разрешены все сервисы и протоколы, которые не указаны как запрещенные.

Наиболее безопасным способом является использование первого принципа, поскольку весь трафик запрещается по умолчанию, а прохождение через границы сети необходимых протоколов и сервисов разрешается сформированными правилами. Для каждого типа разрешенных взаимодействий администратор безопасности должен сформировать правила доступа. Из этого следует, что данный способ формирования правил позволяет реализовать принцип минимальных привилегий, при котором сервисы имеют доступ только к минимально необходимой информации для работы. Также принцип «запрещать все, что явно не разрешено» соответствует классической модели разграничения доступа [3].

При выборе второго принципа снижается сетевая безопасность, но для пользователей системы он будет являться более удобным в использовании. Однако вместе с этим у пользователей появится больше возможностей получить доступ к сервисам, которые не запрещены правилами, либо к запрещенным политикой, но запущенным на нестандартных портах TCP/UDP. Для данного принципа администратору безопасности при составлении правил нужно будет учитывать все возможные варианты запретов, чтобы обеспечить безопасность сети. Из этого следует, что принцип «разрешить все, что явно не запрещено» является не самым оптимальным вариантом, поскольку его реализация ведет к формированию огромного количе-

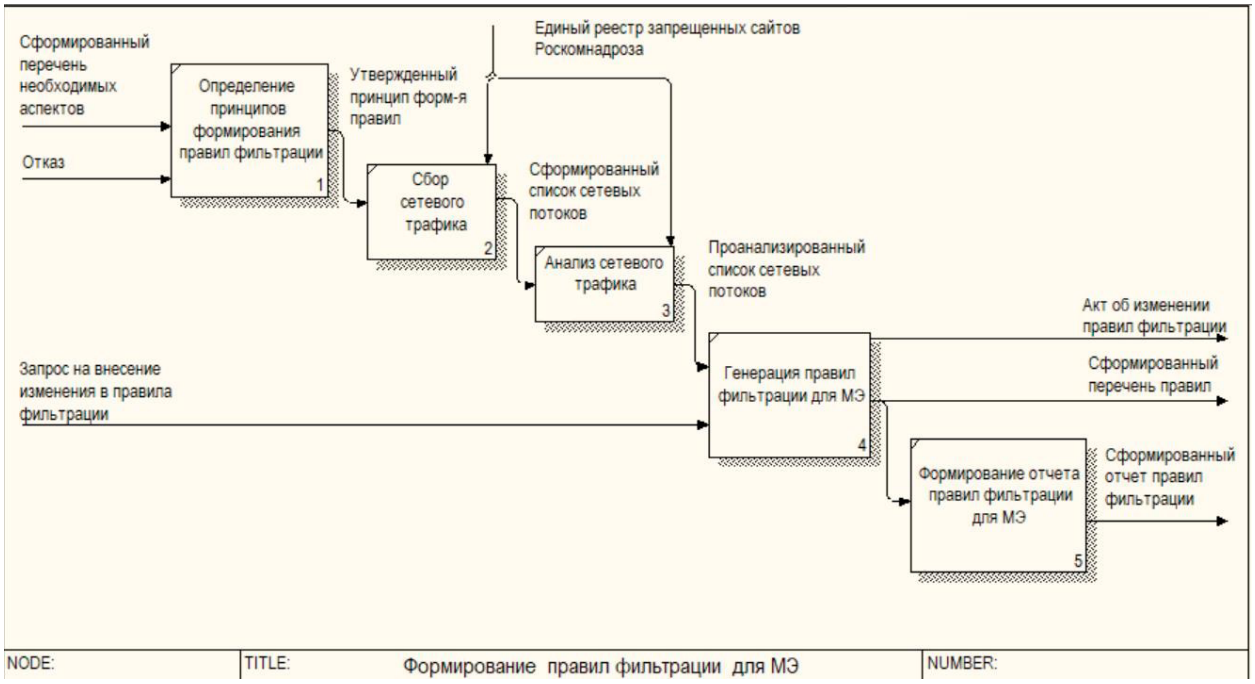


Рис. 1. Структура процесса формирования правил фильтрации для межсетевого экрана

ства правил. А в случае появления нового протокола или сервиса, который ранее не охватывался существующими политиками, приводит к полному пересмотру правил [4].

Процесс формирования правил фильтрации для межсетевого экрана на предприятии представлен на рис. 1. Вначале определяются принципы формирования правил. Ранее уже был выбран принцип «запрещать все, что явно не разрешено». Затем собирается сетевой трафик, а именно информация обо всех IP-адресах, отсортированных по отделам, портах и иных необходимых параметрах. Сбор сетевого трафика можно производить как с целью формирования нового списка правил фильтрации, так и для проведения аудита уже введенного в эксплуатацию перечня. После этого формируются правила фильтрации, при этом каждому адресу определяется информация о запрете или разрешении на допуск к тому или иному ресурсу. По созданному перечню правил формируется отчет.

На этапе формирования правил системный администратор при выборе принципа опира-

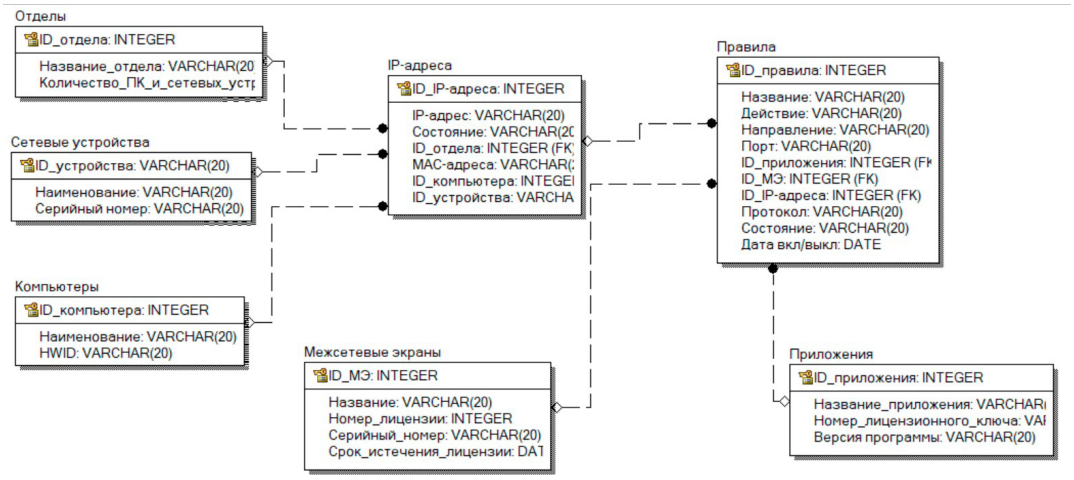


Рис. 2. ER-диаграмма логического уровня модели данных

Правило	Действие	Протокол	Направление	Порт	ID программы	Состояние	Дата включения	IP-адрес	Межсетевой экран
Запросы к серверу DNS по протоколу TCP	Блокировка	TCP	Исходящие	Pool портов	1	Включено	2022-12-21	Любой	Kaspersky Internet Security
Блокировка отправки по электронной почте	Блокировка	TCP	Исходящие	Pool портов	1	Выключен	2022-11-07	192.168.1.2	Kaspersky Internet Security
Сетевая активность для работы технологии удаленног	Блокировка	TCP	Исходящие	Pool портов	1	Включено	2021-05-19	Любой	Kaspersky Internet Security
Доступ к программе 1С:Кадры	Разрешить	TCP,HTTP	Исходящие	Pool портов	4	Включено	2022-01-13	192.168.1.32 - 192.168.1.62	Kaspersky Internet Security
Доступ к программе 1С:Финансы	Разрешить	TCP,HTTP	Исходящие	Pool портов	3	Включено	2022-01-13	192.168.1.128	Kaspersky Internet Security
Доступ к программе 1С:Бухгалтерия	Разрешить	TCP,HTTP	Входящий	Pool портов	8	Включено	2022-01-16	192.168.1.96 - 192.168.1.126	Kaspersky Internet Security
Доступ к программе 1С:Свод отчетов	Разрешить	TCP,HTTP	Исходящий	Pool портов	1	Включено	2021-04-13	192.168.1.96 - 192.168.1.126	Kaspersky Internet Security
Доступ к программе 1С:Бюджетная отчетность	Разрешить	TCP,HTTP	Исходящий	Pool портов	9	Включено	2021-05-12	192.168.1.97	Kaspersky Internet Security
Доступ к программе 1С:Свод отчетов	Разрешить	TCP,HTTP	Исходящий	Pool портов	1	Включено	2021-04-13	192.168.1.96 - 192.168.1.126	Kaspersky Internet Security
Доступ к веб-сайту https://mail.ru	Блокировать	HTTPS	Исходящий	Pool портов	14	Включено	2020-02-16	192.168.1.1	Kaspersky Internet Security
Доступ к веб-сайту https://vk.com	Блокировать	HTTPS	Исходящий/Входящ	Pool портов	15	Включено	2022-11-15	Любой	Kaspersky Internet Security
Доступ к веб-сайту https://www.youtube.com	Блокировать	HTTPS	Исходящий/Входящ	Динамически	16	Включено	2022-03-22	Любой	Kaspersky Internet Security
Доступ из локальной сети в Интернет по определенны	Разрешить	HTTP, HTTPS, FT	Исходящий/Входящ	Pool портов	1	Включено	2022-10-18	Любой	Kaspersky Internet Security
Доступ из локальной сети в Интернет по определенны	Блокировать	TCP, UDP	Исходящий/Входящ	Pool портов	1	Включено	2020-08-06	Любой	Kaspersky Internet Security
Доступ к программе Microsoft Edge	Блокировать	HTTPS	Исходящий/Входящ	Pool портов	11	Включено	2020-03-16	Любой	Kaspersky Internet Security
Доступ к программе Microsoft Store	Блокировать	TCP	Входящий	Динамически	13	Включено	2022-07-14	Любой	Kaspersky Internet Security
Доступ к программе 1С:Бухгалтерия	Блокировать	TCP,HTTP	Исходящий	Pool портов	1	Включено	2021-02-16	192.168.1.1 - 192.168.1.30	Kaspersky Internet Security
Доступ к программе 1С:Кадры	Блокировать	TCP,HTTP	Исходящий	Pool портов	4	Включено	2023-05-17	192.168.1.1 - 192.168.1.30	Kaspersky Internet Security
Доступ к программе 1С:Кадры	Блокировать	TCP,HTTP	Исходящий	Pool портов	4	Выключен	2023-05-20	192.168.1.96 - 192.168.1.126	Kaspersky Internet Security

Рис. 3. Пример отображения сформированного набора правил

ется на информацию о существующих принципах формирования правил, хранящихся в архиве. Затем администратор собирает и записывает информацию о сетевом трафике в реестр сетевого потока. Сведения из данного реестра будут использоваться в анализе сетевого трафика и генерации правил фильтрации. Результат генерации правил сохраняется в архиве правил фильтрации. Если же правила нужно изменить, то системный администратор может добавить, удалить или изменить правила или его параметры, совершенствуя существующий перечень.

Логическая модель данных для реализованной системы автоматизации формирования правил представлена на рис. 2.

Разработанная клиент-серверная информационная система на основе спроектированной модели данных позволяет наглядно отображать правила для межсетевых экранов, как для всего предприятия, так и для отдельных его подразделений. А также имеет функционал по анализу и управлению сформированными правилами. Форма отображения правил представлена на рис. 3.

Разработанная система может использоваться для любого предприятия как инструмент обеспечения информационной безопасности корпоративной сети.

Библиографический список

1. *Шаньгин В. Ф.* Защита информации в компьютерных системах и сетях. ИНФРА-М, 2011. 416 с. ISBN 978-5-16-003132-3.

2. Примеры использования правил межсетевого экрана. URL: https://help.keenetic.com/hc/ru/articles/360000991640- Примеры%20использования-правил-межсетевого-экрана%2047 (дата обращения: 04.11.2024).

3. Политика межсетевого экранирования. URL: https://studfile.net/preview/3009982/page:10/ (дата обращения: 16.10.2024).

4. *Мыльников В. А., Елина Т. Н.* Проектирование архитектуры информационной системы мониторинга уязвимостей при разработке программного обеспечения // Завалишинские чтения 23. Сб. докл. XVIII Международной конференции по электромеханике и робототехнике. СПб., 2023. С. 55–59.

УДК 681.511 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-188-190**

Н. В. Решетникова*
старший преподаватель
С. К. Шорохов*
студент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ВЛИЯНИЕ КОРНЕЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ И КАЧЕСТВО СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В работе исследовано влияние нулей передаточной функции системы на показатели качества системы. Рассмотрен пример определения характеристик переходного процесса с помощью корневого метода и выполнено математическое моделирование зависимости характеристик регулирования от расположения нулей передаточной функции системы.
Ключевые слова: *система управления, переходный процесс, показатели качества, корневой метод, нули передаточной функции.*

N. V. Reshetnikova*
Senior Lecturer
S. K. Shorokhov*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE EFFECT OF THE ZEROS OF THE TRANSFER FUNCTION ON THE STABILITY AND QUALITY INDICATORS OF THE SYSTEM

The paper examines the effect of the zeros of the transfer function of the system on the quality indicators of the system. An example of determining the characteristics of a transient process using the root method is considered and mathematical modeling of the dependence of the control characteristics on the location of the zeros of the transfer function of the system is performed.
Keywords: *control system, transition process, quality indicators, root method, zeros of the transfer function.*

Введение

Системы автоматического управления (САУ) играют ключевую роль в современных технологических системах, обеспечивая стабильность и эффективность работы машин и процессов. В рамках современной теории управления одной из ключевых задач является обеспечение заданных характеристик системы, таких как устойчивость, точность, динамические показатели. В качестве основных методов исследования САУ можно выделить алгебраический, частотный и корневой методы [1]. Наиболее распространенным методом исследования можно считать корневой метод, позволяющий получить данные для определения характеристик переходных процессов системы. Данный способ может вызывать сильные погрешности при качественном анализе переходных процессов, поскольку не учитывает влияние нулей передаточной функции системы, что может приводить к значительным ошибкам в определении показателей качества переходных процессов.

В 1967 г. влияние нулей передаточной функции на качество переходного процесса и необходимость его учета описал Айзерман [2]. В работе [3] рассматриваются зависимости показателей качества переходных процессов от расположения полюсов в системе, имеющей «правый» нуль. В работе [4] рассматриваются сложности корневого метода анализа САУ с доминирующими полюсами, авторы приводят соотношения для нахождения границы области расположения доминирующих полюсов замкнутой системы управления с учетом корней и заданных показателей качества. В работе [5] поднимается вопрос оценки жесткости систем обыкновенных дифференциальных уравнений с учетом влияния взаимного расположения полюсов и нулей. В статье [6] рассматривается синтез регулятора

с помощью метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов для обеспечения высокой параметрической чувствительности системы с учетом расположения нулей передаточной функции.

Следует отметить, что во всех упомянутых работах авторы рассматривают частные системы управления без формирования общего закона изменения характеристик переходных процессов с изменением взаимного расположения полюсов и нулей передаточной функции.

Передаточная функция системы представляет собой отношение преобразования по Лапласу выходной переменной к преобразованию по Лапласу входной переменной при нулевых начальных условиях [7]:

$$W(s)=\frac{B(s)}{A(s)}=\frac{b_m(s-\nu_1)(s-\nu_2)\ldots(s-\nu_m)}{a_n(s-\lambda_1)(s-\lambda_2)\ldots(s-\lambda_n)},$$

где s – оператор Лапласа, b_m и a_n – коэффициенты усиления числителя и знаменателя, ν_i – нули передаточной функции (корни полинома числителя), λ_i – полюса передаточной функции (корни полинома знаменателя).

Рассмотрим пример влияния нулей на переходный процесс системы, имеющей передаточную функцию:

$$W(s)=\frac{0.5s^2+s+2.5}{s^2+s+2.5}. \quad (1)$$

Для системы (1) с помощью корневого метода определим характеристики и устойчивость, для этого нанесем полюса и нули на комплексную плоскость (рис. 1).

Тогда для расчета параметров переходного процесса необходимо воспользоваться следующими формулами [7]:

$$t_P=\frac{3}{\mathrm{Re}(\lambda)}, \quad (2)$$

где t_P – время регулирования, Re(λ) – вещественная часть ближайшего из корней к мнимой оси;

$$\delta=e^{-\pi\left|\frac{\mathrm{Re}(\lambda)}{\mathrm{Im}(\lambda)}\right|}\cdot 100\%, \quad (3)$$

где δ – перерегулирование, Im(λ)– вещественная часть наибольшего корня.

Тогда для системы (1) характеристики без учета нулей:

$$t_P=\frac{3}{0.5}=6\text{ с},\ \delta=e^{-\pi\frac{0.5}{1.5}}\cdot 100\%=35.09\%.$$

Согласно графику переходного процесса системы, представленному на рис. 2, δ=21.7%, t_P=6.7 с. Таким образом, определяемые только по полюсам значения характеристик переходного процесса не соответствуют результатам моделирования. Однако формула (1) позволяет приблизительно оценить время переходного процесса.

Для оценки влияния нулей выполнено моделирование переходных процессов большого количества передаточных функций систем с различным расположением нулей относительно неподвижных полюсов. Моделирование проводилось для передаточной функции типа:

$$W(s)=\frac{b_m(s-\nu_1)(s-\nu_2)}{s^2+s+1}.$$

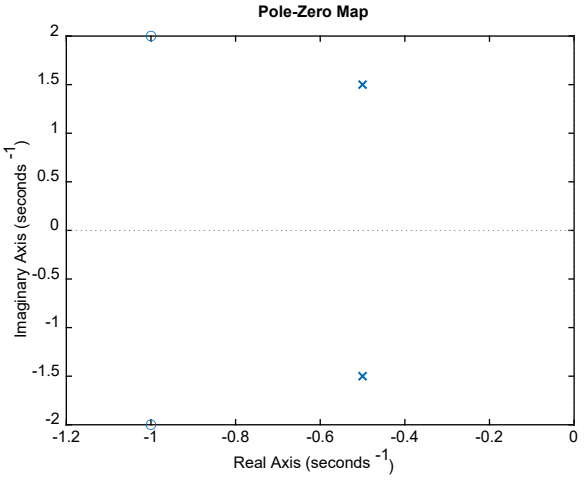


Рис. 1. Расположение нулей и корней системы (1) на комплексной плоскости

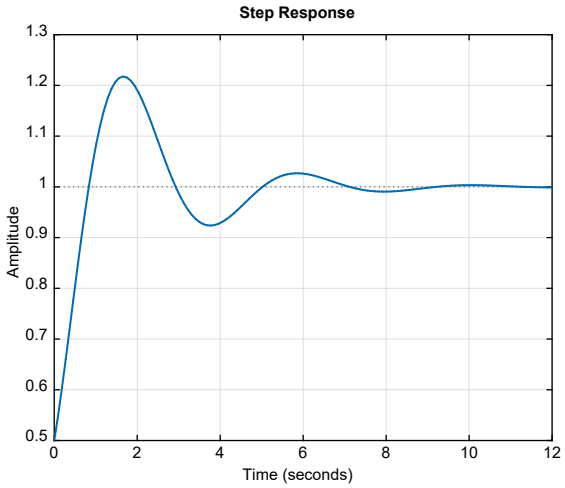


Рис. 2. Переходный процесс системы (1)

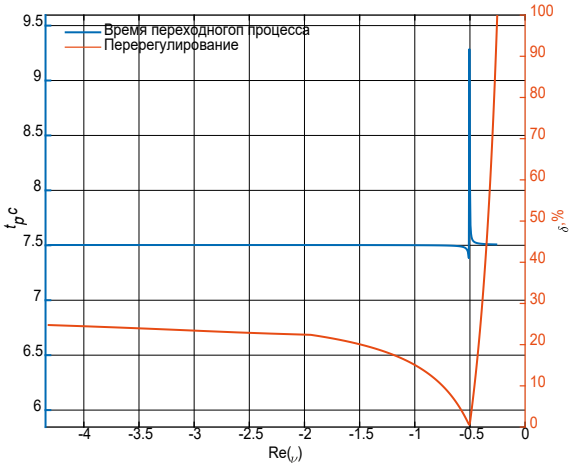


Рис. 3. Графики зависимостей характеристик переходного процесса в зависимости от координат нулей

На рис. 3 представлены графики зависимостей времени переходного процесса и перерегулирования от вещественной части нулей передаточной функции.

Основываясь на графиках, представленных на рис. 3, можно сделать вывод о том, что при удалении от мнимой оси за пределами области компенсации полюсов и нулей наблюдается постоянство времени переходного процесса и незначительное повышение перерегулирования. Областью компенсации называют такую область, в которой расстояние между полюсом и корнем на порядок и более меньше их модулей и обычно считают ее равной ≈10%. Уменьшение перерегулирования при приближении координат нулей к координатам полюсов объясняется попаданием нуля в область компенсации. Резкое увеличение перерегулирования и времени регулирования в области близкого расположения нулей к полюсу можно объяснить уменьшением доминантности полюса и уменьшением жесткости характеристики переходного процесса.

Таким образом, при модальном синтезе систем автоматического управления, при синтезе корректирующих устройств, исследовании систем с помощью корневого метода и т. д. необходимо учитывать взаимное влияние нулей и полюсов, так как пренебрежение влияния нулей может привести к уменьшению запасов устойчивости и сильному изменению характеристик переходных процессов.

Библиографический список

1. *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1996. 992 с.

2. *Айзерман М. А.* Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Кн. 1. Математическое описание, анализ устойчивости и качества систем автоматического регулирования. М.: Машиностроение, 1967. 770 с.

3. *Вороной В. В., Воевода А. А.* О влиянии нулей «справа» на переходные процессы в системе // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2013. № 2(72). С. 19–29.

4. Определение желаемой области расположения доминирующих полюсов замкнутой системы с учетом ее нулей / С. В. Ефимов [и др.]. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2008. Т. 312. № 5. С. 57–61.

5. *Нестеров А. В., Нестеров С. В.* О влиянии взаимного расположения полюсов и нулей на жесткость математической модели САУ // Компьютерные науки и информационные технологии: Материалы Международной научной конференции, Саратов, 01–04 июля 2012 г. Саратов: ИЦ «Наука», 2012. С. 227–230.

6. *Тютиков В. В., Воронин А. И.* Анализ влияния нулей передаточной функции объекта на параметрическую чувствительность систем, синтезированных по методу АКАР // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2012. №. 2. С. 48–51.

7. *Ким Д. П.* Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. 2-е изд., испр. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. 312 с.

УДК 681.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-191-197**

А. М. Рулев*
ассистент
М. С. Брунов*
старший преподаватель
И. Г. Криволапчук*
старший преподаватель
В. Ф. Шишлаков*
доктор технических наук, профессор
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИРРАЦИОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ТИПОВЫХ СТАТИЧЕСКИХ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрены вопросы применения иррациональных функций для аппроксимации типовых статических нелинейностей на примере систем автоматического управления, содержащих нелинейные элементы, оказывающие существенное влияние на динамику рассматриваемых систем. Установлена принципиальная возможность получения достаточно высокого качества аппроксимации типовых статических нелинейностей иррациональными функциями.
Ключевые слова: *системы автоматического управления, нелинейные системы, статическая нелинейность.*

A. M. Rulev*
Assistant
M. S. Brunov*
Senior Lecturer
I. G. Krivolapchuk*
Senior Lecturer
V. F. Shishlakov*
Dr. Sc. Tech., Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE USE OF IRRATIONAL FUNCTIONS TO APPROXIMATE TYPICAL STATIC NONLINEARITIES OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

The issues of using irrational functions to approximate typical static nonlinearities are considered on the example of automatic control systems with feedback in the presence of nonlinear elements that have a significant impact on the dynamics of the system are consideration. The principal possibility of obtaining a satisfactory approximation quality by irrational functions has been established.
Keywords: *automatic control systems, nonlinear systems, static nonlinearity.*

Для повышения точности решения задачи параметрического синтеза нелинейных систем автоматического управления (САУ) с помощью обобщенного метода Галёркина выполняется аппроксимация нелинейных элементов (НЭ), описываемого кусочно-линейной функцией, некоторой гладкой функцией [1]. Существует множество различных методов аппроксимации нелинейностей [2, 3], среди которых известен метод аппроксимации иррациональными функциями, рассмотренный в [4] на примере механической характеристики асинхронной трехфазной машины, а также в [5] для системы со статической нелинейностью типа «насыщение». Представляет интерес рассмотрение данного метода в применении к типовым статическим нелинейностям.

Цель настоящей статьи состоит в том, чтобы установить и подтвердить эффективность аппроксимации типовых статических нелинейностей иррациональными функциями для последующего использования полученных результа-

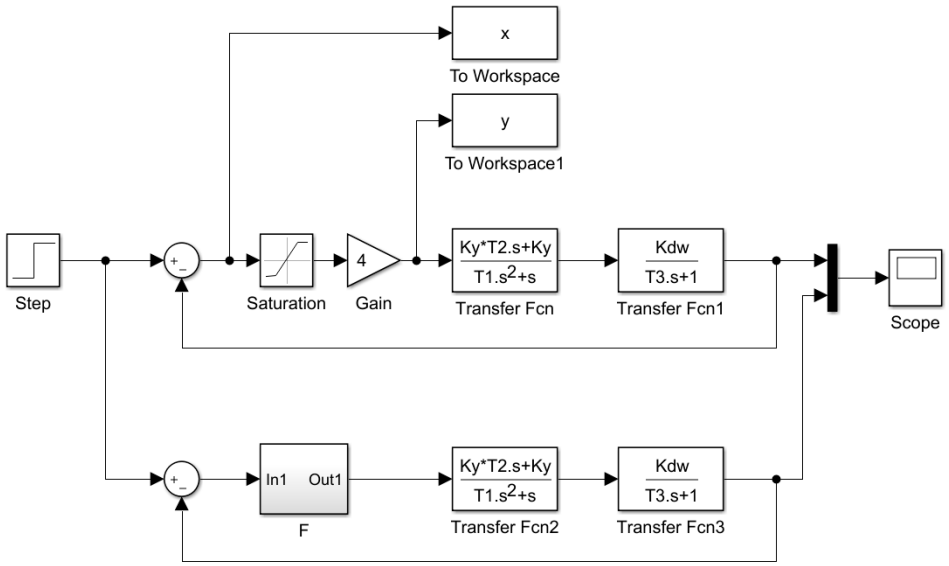


Рис. 1. Структурная схема математической модели системы с аппроксимацией нелинейности «насыщение»

тов при решении задачи параметрического синтеза нелинейных САУ методом Галёркина.

Аппроксимацию типовых статических нелинейностей предполагается выполнять с помощью иррациональной функции вида:

$$F = \frac{Ax}{B + x^2} + C|x|^{0,3}, \qquad (1)$$

поскольку для функций вида (1) известны общие результаты вычисления интегралов Галёркина, что существенно упрощает задачу.

Таким образом, задача аппроксимации состоит в отыскании таких значений коэффициентов A, B и C, при которых среднеквадратичное отклонение значений функции (1) от значений статической характеристики аппроксимируемой нелинейности минимально или не превышает заданного значения.

Рассмотрим ряд типовых статических нелинейностей, чаще всего встречающихся в практике проектирования САУ: «насыщение», «реле» и «зона нечувствительности».

Структурная схема математической модели системы управления электродвигателем, содержащей нелинейность «насыщение», представлена на рис. 1.

Математическое описание НЭ «насыщение» имеет следующий вид:

$$y = \begin{cases} -0,8, x \le -0,2, \\ 4x, -0,2 < x < 0,2, \\ 0,8, x \ge 0,2. \end{cases}$$

Результаты экспериментов с алгоритмом аппроксимации показали, что целесообразно принять в качестве аппроксимирующей функцию:

$$F = \frac{A_1 x}{B_1 + x^2} + \frac{A_2 x}{B_2 + x^2}, \qquad (2)$$

которая представляет собой сумму двух функций вида (1) с коэффициентом C, принятым равным нулю (поскольку в результате вычислительных экспериментов было установлено, что для рассматриваемой системы наличие второго слагаемого в (1) ухудшает качество аппроксимации). Очевидно, что данное решение практически не повлияет на трудоемкость процесса вычисления интегралов Галёркина, поскольку интеграл функции вида (2) сводится к сумме интегралов функции вида (1) с коэффициентами C, равными нулю.

Значения параметров функции (2), полученные после аппроксимации:

$$A_1 = 0,36, A_2 = 2,77, B_1 = 0,094, B_2 = 4,96.$$

Статические характеристики исходной (real) и аппроксимированной (model) нелинейности представлены на рис. 2.

Переходные процессы в исходной системе (real) и в системе с аппроксимирующей функцией (model) представлены на рис. 3.

Из рис. 2 видно, что прямолинейные участки статических характеристик исходной и аппроксимированной нелинейности практически совпадают, при этом вблизи точки сопряжения

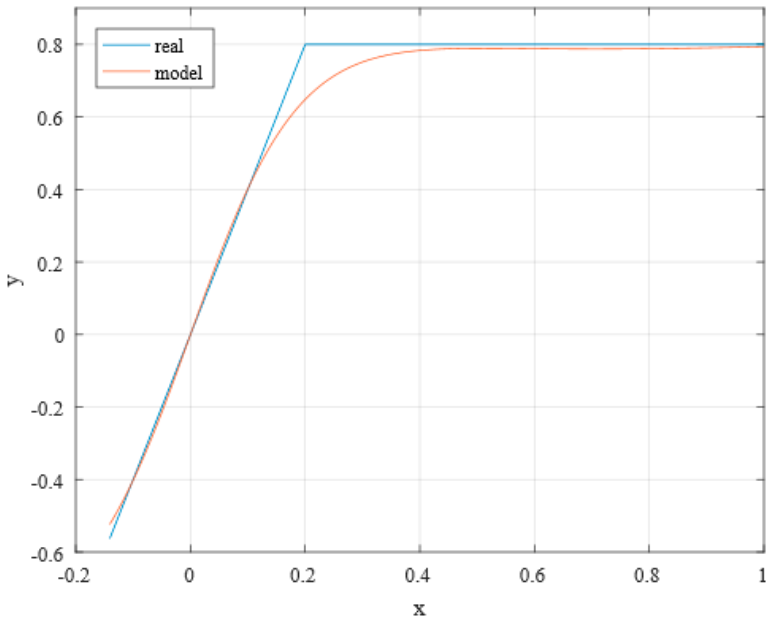


Рис. 2. Статические характеристики исходной (real) и аппроксимированной (model) нелинейности «насыщение»

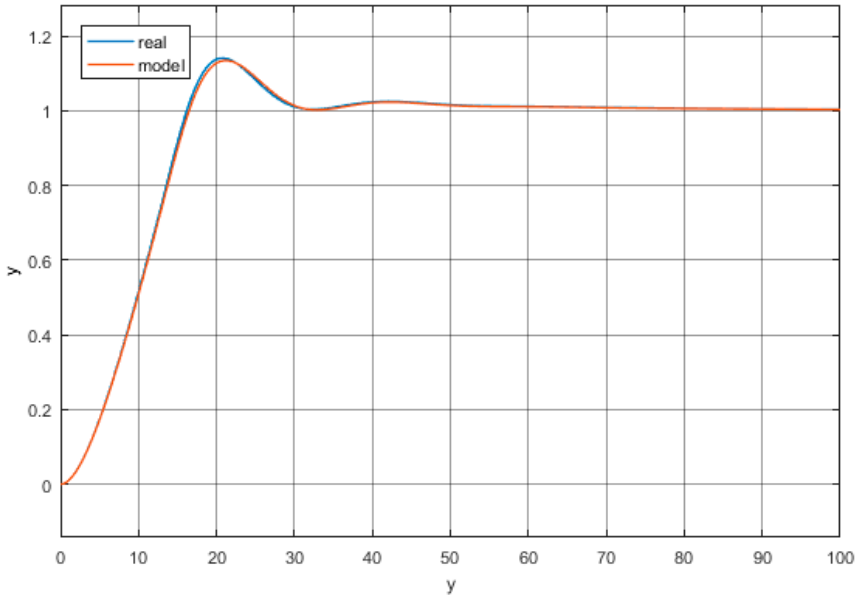


Рис. 3. Переходные процессы в исходной (real) и аппроксимированной (model) системе с нелинейностью «насыщение»

этих участков наблюдается наибольшая ошибка аппроксимации, которая, как следует из рис. 3, практически не сказывается на близости переходных процессов в исходной системе и системе с аппроксимированной нелинейностью.

Структурная схема математической модели системы с нелинейностью вида $y = \text{sign}(x)*x^2$, часто использующейся для описания момента вязкого трения в элементах систем управления электроприводом, представлена на рис. 4.

Данная нелинейность содержит элемент «реле» и описывается следующим образом:

$$y = \begin{cases} -x^2, x < 0, \\ x^2, x \geq 0. \end{cases}$$

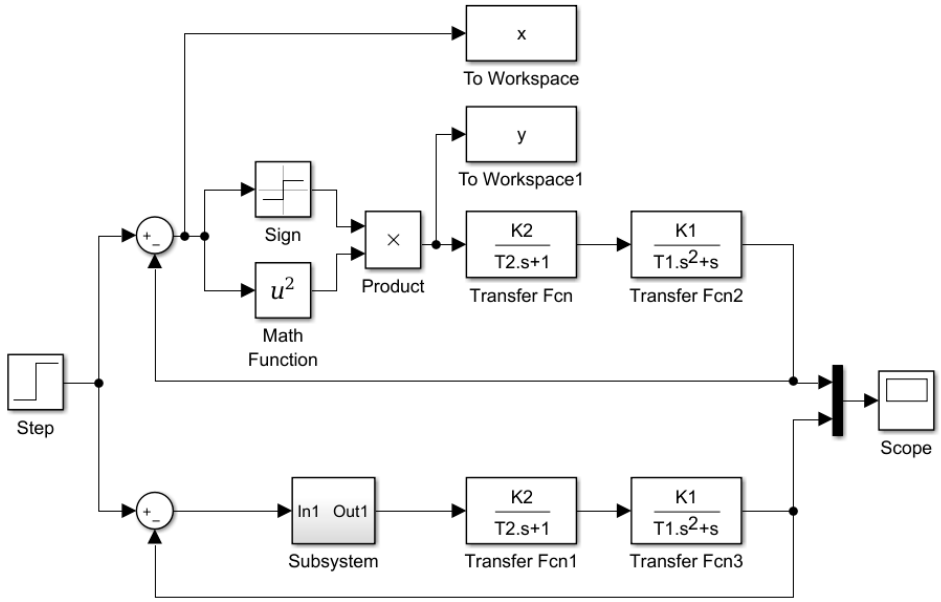


*Рис. 4. Структурная схема математической модели системы с аппроксимацией нелинейности вида y = sign(x)*x²*

При аппроксимации данной нелинейности так же, как и в предыдущем случае, оказывается удобным использовать аппроксимирующую функцию вида (2).

Значения коэффициентов, полученные после аппроксимации:

A1 = 25,9, B1 = 11,74, A2 = -2,1, B2 = 1.

Статические характеристики исходной (real) и аппроксимированной (model) нелинейности представлены на рис. 5.

Переходные процессы в исходной системе (real) и системе с аппроксимирующей функцией (model) представлены на рис. 6.

Из рис. 5 и 6 видно, что статические характеристики исходного и аппроксимированного НЭ,

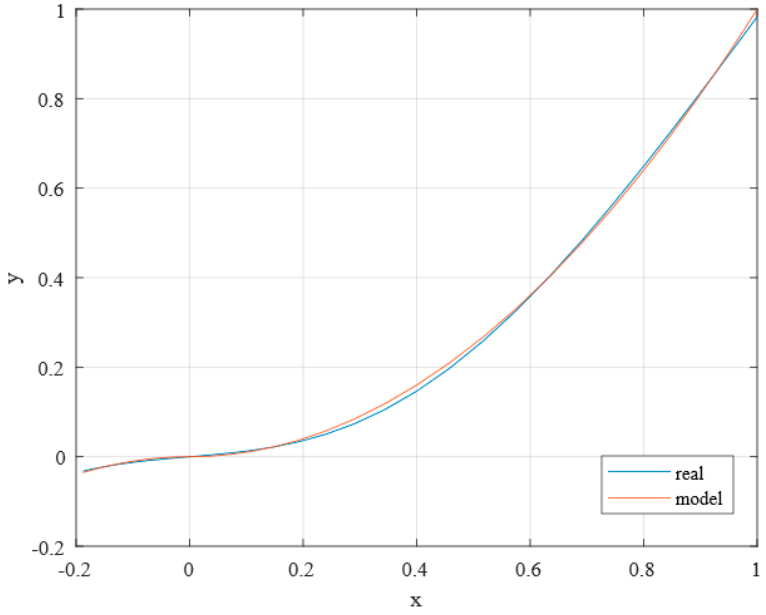


*Рис. 5. Статические характеристики исходной (real) и аппроксимированной (model) нелинейности вида y = sign(x)*x²*

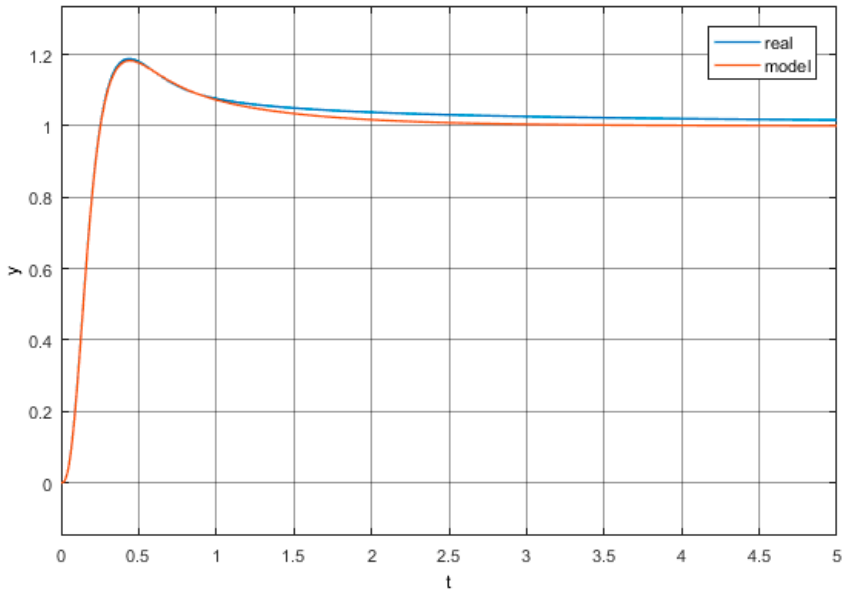


*Рис. 6. Переходные процессы в исходной (real) и аппроксимированной (model) системе с нелинейностью вида y = sign(x)*x²*

а также переходные процессы на выходе исходной системы и системы с аппроксимированным НЭ практически совпадают, что говорит о достаточно высоком качестве аппроксимации.

«Зона нечувствительности» НЭ часто используется при математическом моделировании систем управления электроприводом. Например, данной нелинейностью описывается пуск двигателя постоянного тока, обладающего моментом трогания, который может оказывать значительное влияние на переходные процессы в двигателе. В качестве примера можно рассмотреть двигатель серии M2232U [6], структурная схема математической модели которого представлена на рис. 7.

В данном случае аппроксимация с помощью функции вида (2) не позволила достичь приемлемого результата ввиду особенностей формы статической характеристики НЭ «зона нечувствительности». По этой причине к аппроксимирующей функции (2) было добавлено третье слагаемое:

$$F = \frac{A_1 x}{B_1 + x^2} + \frac{A_2 x}{B_2 + x^2} + \frac{A_3 x}{B_3 + x^2}. \qquad (3)$$

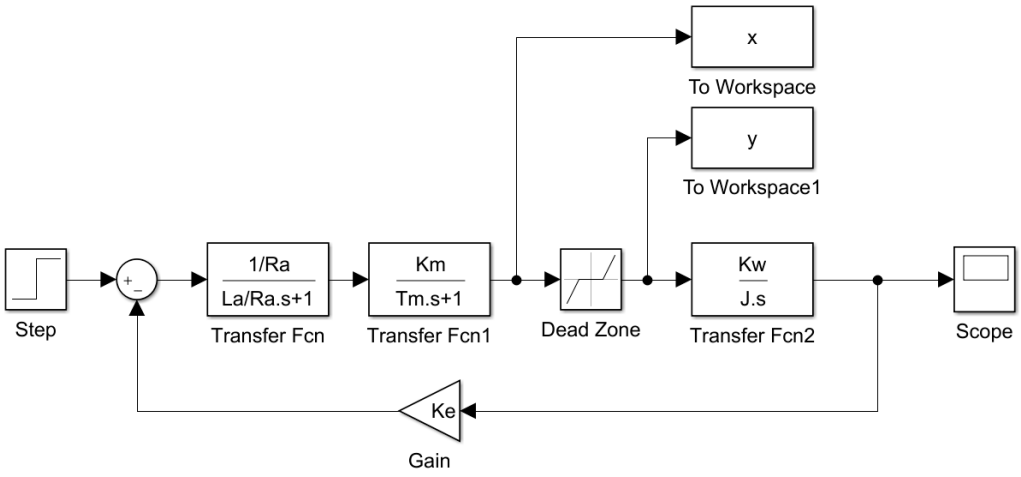


Рис. 7. Структурная схема математической модели системы с аппроксимацией нелинейности «зона нечувствительности»

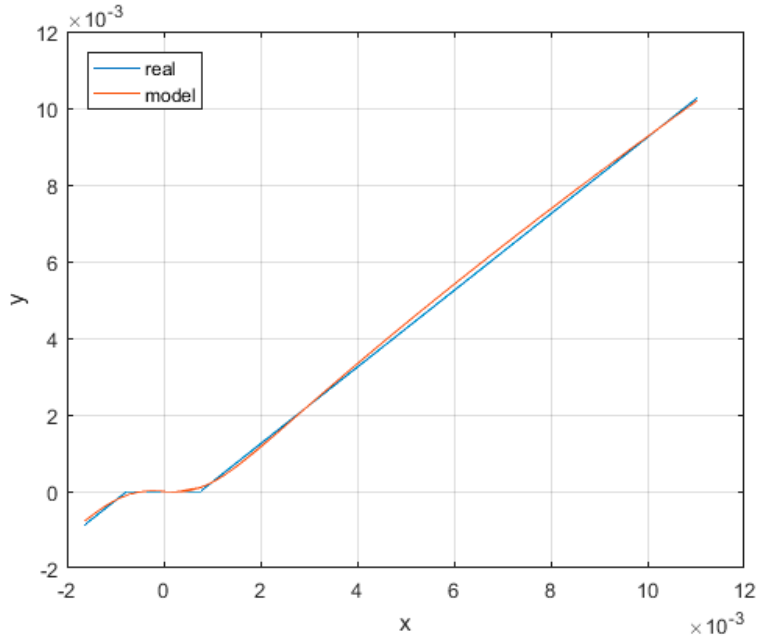


Рис. 8. Статические характеристики исходной (real) и аппроксимированной (model) нелинейности «зона нечувствительности»

Значения коэффициентов, полученные после аппроксимации:

$A1 = -2{,}6 \cdot 10^{-6}$, $B1 = 2{,}5 \cdot 10^{-6}$, $A2 = 8{,}8 \cdot 10^{-4}$, $B2 = 0{,}0033$, $A3 = 0{,}0027$, $B3 = 0{,}0038$.

Статические характеристики исходной (real) и аппроксимированной (model) нелинейности «зона нечувствительности» представлены на рис. 8.

Переходные процессы в исходной системе (real) и системе с аппроксимацией (model) представлены на рис. 9.

Из рис. 8 и 9 так же видно, что статические характеристики исходного и аппроксимирован-

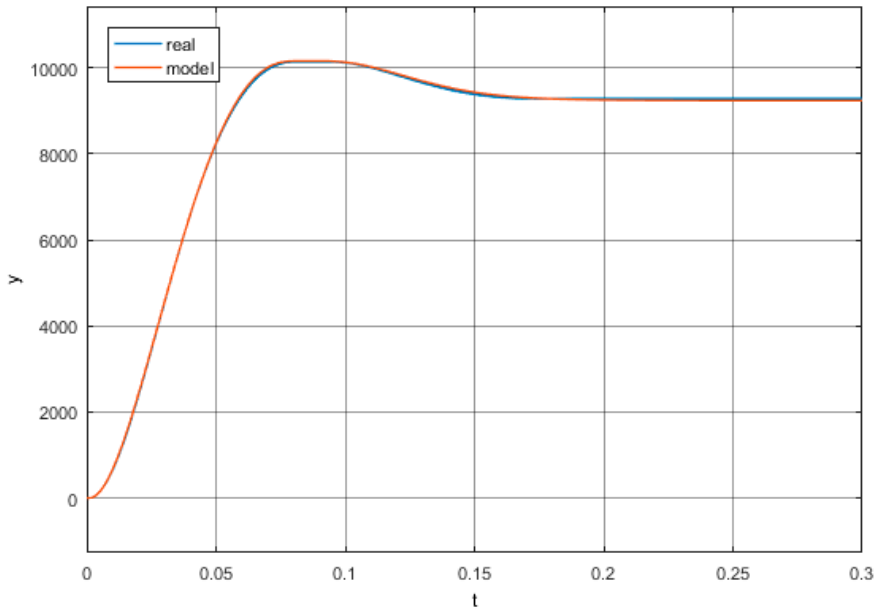


Рис. 9. Переходные процессы в исходной (real) и аппроксимированной (model) системе с нелинейностью «зона нечувствительности»

ного НЭ, а также переходные процессы на выходе исходной системы и системы с аппроксимированным НЭ практически совпадают.

Таким образом, применение иррациональных функций вида (1–3) позволяет добиться достаточно высокого качества аппроксимации типовых статических нелинейностей. Полученные результаты могут быть использованы для решения задачи параметрического синтеза нелинейных САУ обобщенным методом Галёркина.

Библиографический список

1. Синтез параметров закона управления для нелинейных САУ при различных видах аппроксимации характеристик / В. Ф. Шишлаков [и др.] // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 9. С. 701–706.

2. Полиномиальная аппроксимация в решении задач синтеза нелинейных САУ / Е. Ю. Ватаева, Н. Л. Гречкин, В. Ф. Шишлаков // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: XXVI Междунар. науч. конф. (СПб., 29 мая – 2 июня 2023 г.): сб. статей: в 3 ч. Ч. 1. СПб.: ГУАП, 2023. С. 161–167.

3. Синтез САУ при различных видах аппроксимации нелинейных характеристик: теория и практика: моногр. / В. Ф. Шишлаков, А. В. Шишлаков, С. С. Тимофеев; под ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2017. 151 с.

4. *Шишлаков В. Ф., Анисимова Е. В.* Аппроксимация характеристик нелинейных звеньев систем автоматического управления иррациональными функциями // Завалишинские чтения’14: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2014. С. 116–123.

5. Исследование динамики системы автоматического управления при аппроксимации нелинейного звена иррациональной функцией / М. С. Брунов [и др.] // Завалишинские чтения’24: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2024. С. 139–145.

6. DC-Micromotors Series M223U..GS. URL: https://www.faulhaber.com/en/products/series/2233s/ (дата обращения: 10.12.2024).

УДК 62-529 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-198-205**

А. М. Рулев*
ассистент
Д. О. Якимовский*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

О РАЗРАБОТКЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИЛОВОГО ГИРОСКОПА С УЧЕТОМ СБОЕВ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ

Рассмотрены особенности математического и имитационного моделирования исполнительного электропривода силового гироскопического комплекса при наличии сбоев в микроконтроллерах блока управления приводом и измерителя углового положения. Произведена оценка влияния сбоев микроконтроллеров на показатели качества переходных процессов на выходе исполнительного электропривода, решена задача определения максимально допустимой длительности сбоев микроконтроллеров.
Ключевые слова: *электропривод, микроконтроллеры, системы автоматического управления, цифровые системы.*

A. M. Rulev*
Assistant
D. O. Yakimovsky*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ABOUT THE DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF AN EXECUTIVE ELECTRIC DRIVE OF POWER GYROSCOPE TAKING INTO ACCOUNT FAILURES OF MICROCONTROLLERS

The features of mathematical and simulation modeling of an executive electric drive of power gyroscope in the presence of failures in the microcontrollers of the drive control unit and the angular position meter are considered. The estimation of the impact of failures on the quality indicators of transients at the output of the executive electric drive was performed, the problem of determining the maximum achievable duration of failures of the microcontrollers was solved.
Keywords: *electric drive, microcontrollers, automatic control systems, digital systems.*

В состав исполнительного электропривода (ИЭП) современного силового гироскопического комплекса (СГК), как правило, входят два блока (или системы), содержащие микроконтроллеры: блок управления приводом (БУП), в котором реализуется алгоритм управления движением ПС, и блок измерителя углового положения (ИУП), в котором происходит хранение и обработка информации, поступающей с датчика угла [1–3].

В микроконтроллерах (МК) возможны сбои в работе, в частности из-за действия внешних воздействующих факторов [4, 5]. Частота сбоев является одним из показателей надежности техники. Реакция на сбой может быть различной, например возможен переход на резервный канал, или игнорирование сбоя. Таким образом, при разработке ИЭП возникает проблема, связанная с необходимостью учитывать влияние сбоев микроконтроллеров на динамику системы. Также возникает задача определения максимально допустимого времени, в течение которого микроконтроллер должен вернуться в рабочее состояние, в котором находился до сбоя.

Цель настоящей статьи заключается в уточнении математической и имитационной модели исполнительного электропривода путем рассмотрения процесса сбоя МК БУП и МК ИУП. Для достижения поставленной цели в среде имитационного моделирования осуществляется разработка блоков, имитирующих сбои МК, производится оценка влияния длительности сбоев

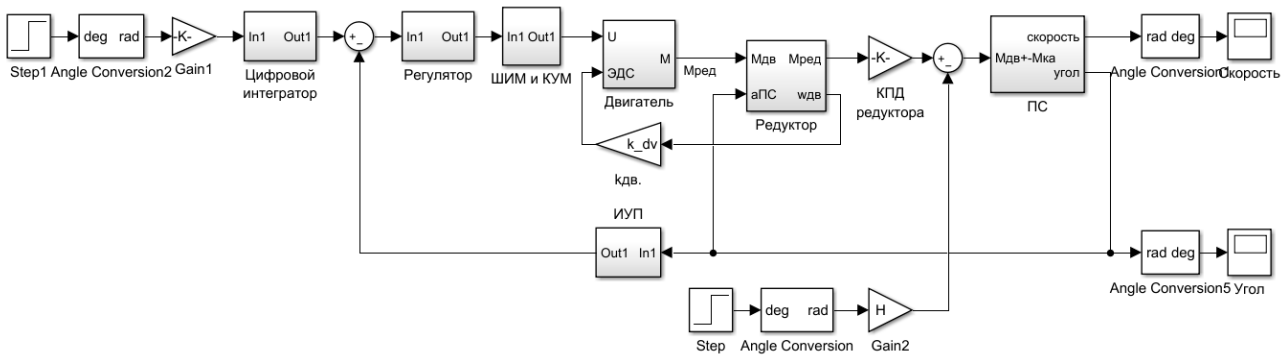


Рис. 1. Структурная схема математической модели ИЭП (общий вид)

на показатели качества переходных процессов на выходе ИЭП, определяются максимально допустимые значения длительности сбоев. В качестве объекта управления выступает ПС СГК с кинетическим моментом H=40 Н·м·с.

Рассмотрим модель ИЭП, осуществляющего управление угловым положением ПС СГК (вопросы разработки математических моделей ИЭП подобного типа более подробно рассматриваются в [6]). Общий вид структурной схемы математической модели ИЭП, используемой при имитационном моделировании, представлен на рис. 1.

В БУП входят следующие элементы (первые три из которых реализуются на микроконтроллере):

1) Цифровой интегратор скорости, выполняющий преобразование кода задаваемой скорости в код задаваемого углового положения ПС.

2) Регулятор угла, в качестве которого используется цифровой ПИ-регулятор с передаточной функцией вида:

$$W_{ПИ}(z) = K_П + K_И \frac{T_s z}{z-1};$$

3) Широтно-импульсный модулятор (ШИМ), преобразующий код управляющего воздействия в последовательность прямоугольных импульсов с переменной скважностью.

4) Ключевой усилитель мощности (КУМ), выполняющий усиление выходного напряжения микроконтроллера до значений, обеспечивающих управление исполнительным электродвигателем.

Блок ИУП представляет собой датчик углового положения, соединенный с фильтром.

При сбое МК БУП происходит кратковременный (от 10 до 100 мс) отказ работы микро-

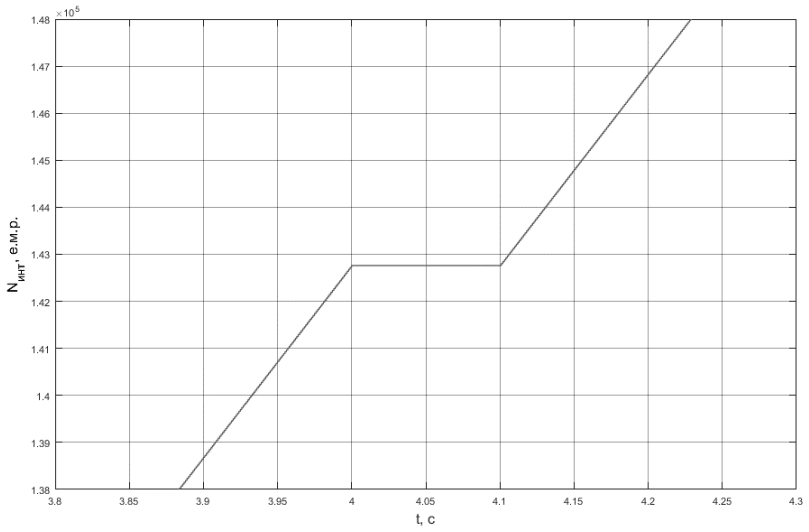


Рис. 2. Динамическая характеристика цифрового интегратора в режиме сбоя

контроллера. В этом случае исходим из следующих предположений. Во-первых, управляющий код, поступающий к блоку ШИМ и КУМ, в течение времени сбоя становится равным нулю, следовательно, момент на валу исполнительного двигателя в течение сбоя также равен нулю. При этом МК БУП сохраняет в своих регистрах код последнего вычисленного значения интеграла задаваемой скорости, и по истечении времени сбоя продолжает отсчет с этого значения. Динамическая характеристика цифрового интегратора, иллюстрирующая процесс сбоя, изображена на рис. 2 (время начала сбоя – 4 с, длительность сбоя – 10 мс).

Во-вторых, поскольку при сбое МК БУП работоспособность МК ИУП сохраняется, то код углового положения на выходе МК ИУП продолжает изменяться в течение времени сбоя. Следовательно, по окончании сбоя цифровой регулятор угла продолжит работу с входным сигналом, отличным от такового до сбоя. Динамическая характеристика цифрового регулятора угла в режиме сбоя изображена на рис. 3 (время начала и длительность сбоя те же, что на рис. 2).

Для имитации сбоя интегратора и регулятора (блоки «Сбой МК БУП1» и «Сбой МК БУП2») МК БУП используется структурная схема, представленная на рис. 4.

В схеме на рис. 4 в момент времени $t = 5$ с на блок умножения поступает сигнал вида:

$$\begin{cases} 1, t < 5, \\ 0,5c \le t \le 5c + t_{сб}, \\ 1, t > 5c, \end{cases} \quad (1)$$

где $t_{сб}$ – длительность сбоя.

При сбое МК ИУП происходит кратковременное (от 10 до 100 мс) размыкание конту-

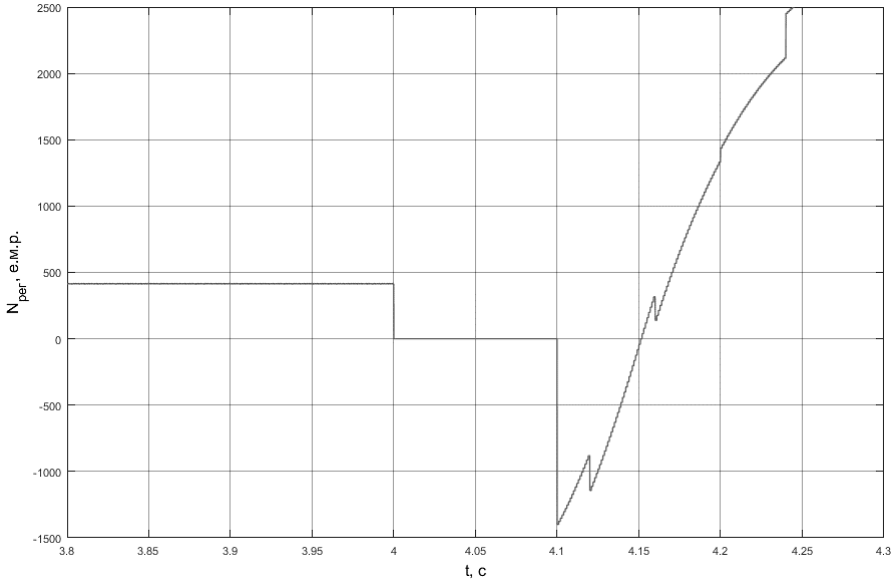


Рис. 3. Динамическая характеристика цифрового регулятора угла в режиме сбоя

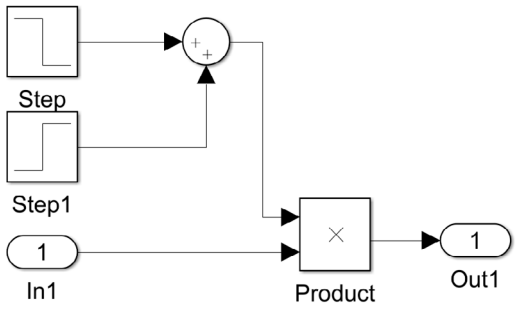


Рис. 4. Структурная схема модели, имитирующей сбой МК БУП

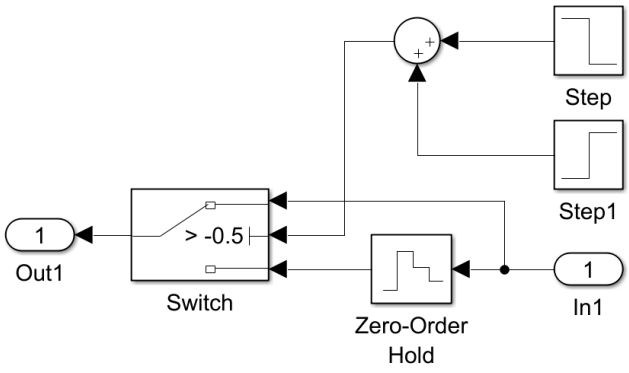


Рис. 5. Структурная схема модели, имитирующей сбой МК ИУП

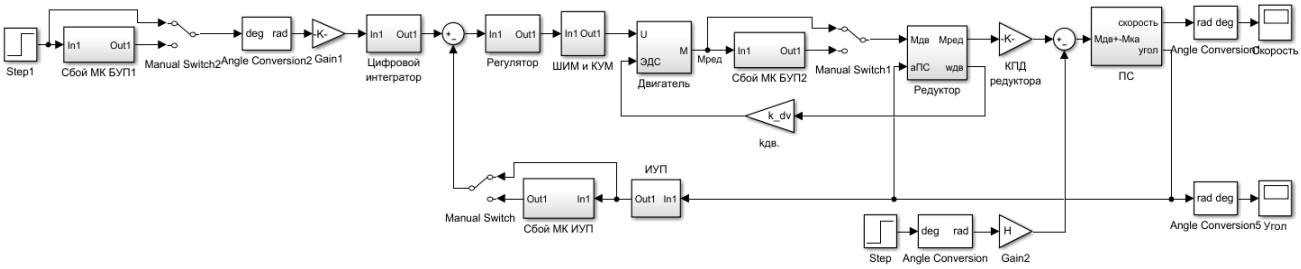


Рис. 6. Структурная схема математической модели ИЭП в режиме сбоя МК БУП и МК ИУП (общий вид)

ра управления угловым положением ПС, при этом по истечении времени сбоя выходной сигнал ИУП принимает значение, соответствующее углу, на который повернется ПС при работе ИЭП в разомкнутом состоянии.

Для имитации сбоя МК ИУП (блок «Сбой МК ИУП») используется структурная схема, представленная на рис. 5.

В схеме на рис. 5 в момент времени $t = 5$ с на переключатель поступает сигнал вида (1), переводящий систему в режим сбоя, в котором на сумматор поступает постоянное значение последнего кода сигнала ИУП, записанное микроконтроллером (в структурной схеме модели этот процесс имитируется с помощью фиксатора нулевого порядка).

Общий вид структурной схемы модели ИЭП, учитывающей работу ИЭП в режиме сбоя МК БУП и МК ИУП, представлен на рис. 6.

Переходные процессы, полученные в результате моделирования ИЭП при различных значениях длительности сбоя МК БУП и задаваемой скорости вращения ПС, равной 30°/с, приведены на рис. 7–10.

Из представленных графиков следует, что при выбранных параметрах регулятора сбой МК БУП вызывает переходные процессы по скорости и углу поворота ПС, при этом максимальные отклонения значений угловой скорости и угла поворота ПС от задаваемых, а также значения времени возникающих после сбоя переходных процессов возрастают с увеличением длительности сбоя.

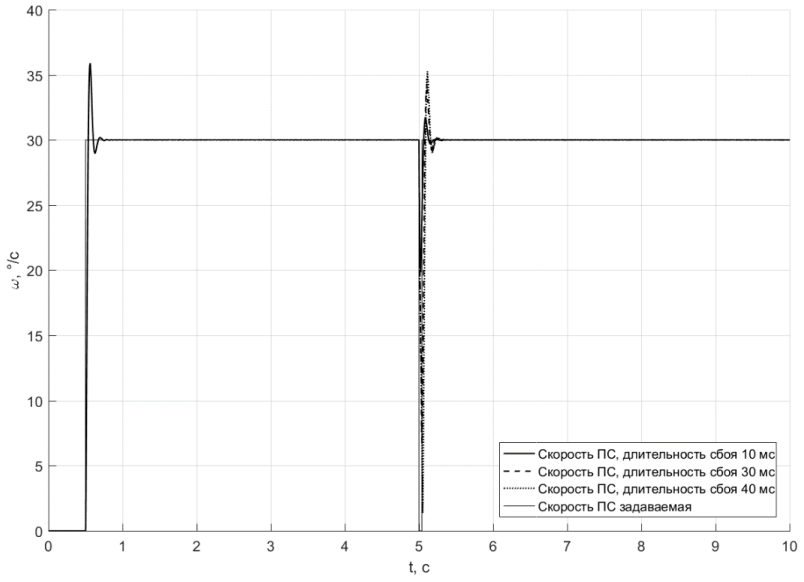


Рис. 7. Переходные процессы по скорости вращения ПС при сбое МК БУП, ω_0=30°/с, $\omega_{КА}$=0°/с (общий вид)

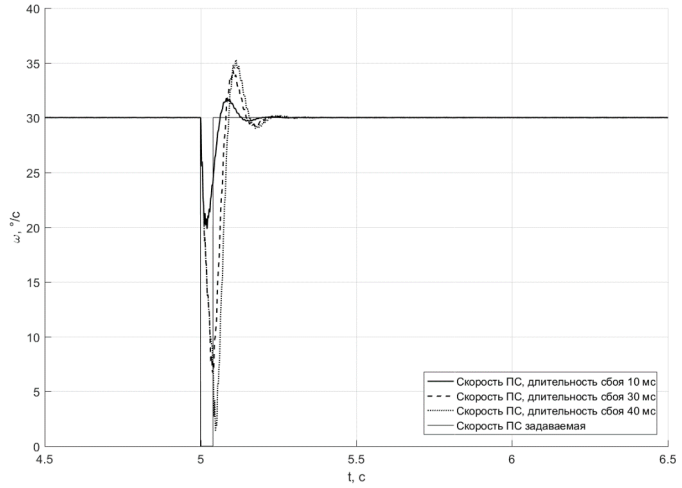


Рис. 8. Переходные процессы по скорости вращения ПС при сбое МК БУП, ω_0=30°/с, $\omega_{КА}$=0°/с (увеличенный масштаб)

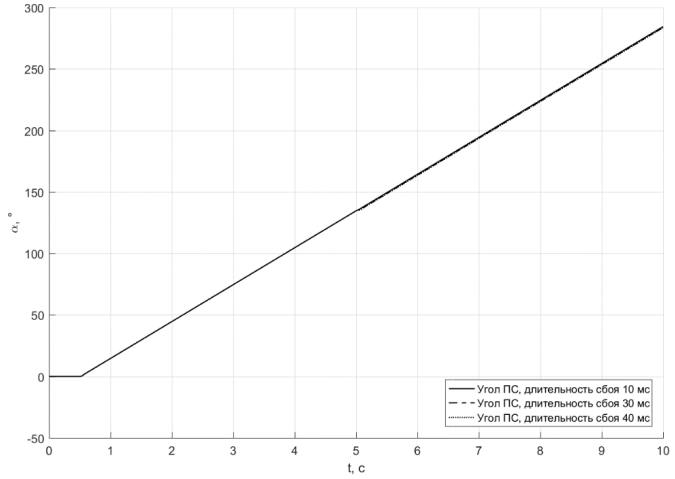


Рис. 9. Переходные процессы по углу поворота ПС при сбое МК БУП, ω_0=30°/с, $\omega_{КА}$=0°/с (общий вид)

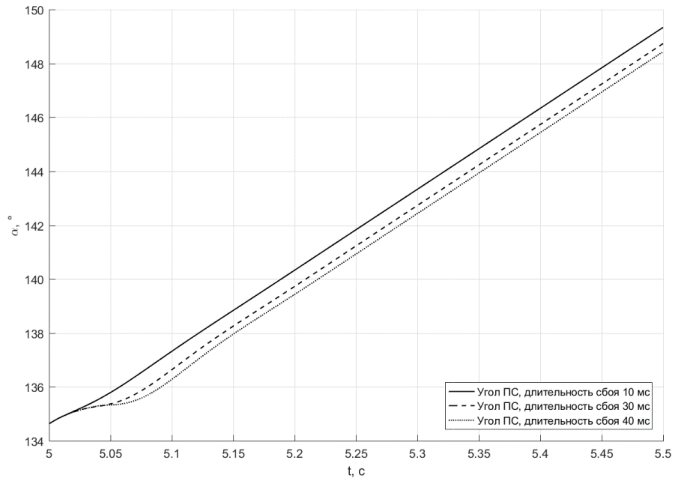


Рис. 10. Переходные процессы по углу поворота ПС при сбое МК БУП, ω_0=30°/с, $\omega_{КА}$=0°/с (увеличенный масштаб)

Таблица 1

Отклонения средней угловой скорости ПС при сбое МК БУП

Режим ИЭП	$t_{сб}$, мс	Δω, °/с	$\Delta\omega_{max}$, °/с
$\omega_{ПС}$=30°/с, $\omega_{КА}$=0 °/с	10	0,15	0,5
	20	0,3	
	30	0,4	
	40	**0,59**	
$\omega_{ПС}$=30°/с, $\omega_{КА}$=2 °/с	10	0,15	
	20	0,3	
	30	0,4	
	40	**0,59**	
$\omega_{ПС}$=30°/с, $\omega_{КА}$=-2 °/с	10	0,15	
	20	0,3	
	30	0,4	
	40	**0,59**	

Примечания: $t_{сб}$ – длительность сбоя, Δω – отклонение средней угловой скорости ПС от заданной, $\Delta\omega_{max}$ – максимально допустимое отклонение средней угловой скорости ПС от заданной.

Критерий оценки качества переходных процессов основан на определении средней скорости вращения ПС на заданном интервале и формулируется следующим образом:

$$\omega_0 - \omega_{ср} \le \Delta\omega_{max}$$

где ω_0, $\omega_{ср}$ – задаваемое и среднее значение угловой скорости ПС соответственно, $\Delta\omega_{max}$ – допускаемое отклонение средней угловой скорости ПС от задаваемой.

Для определения среднего значения угловой скорости ПС используется интегральная оценка среднего значения функции ω(*t*):

$$\omega_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T \omega(t)dt,$$

где *T*=1 с – интервал осреднения.

Значение $\omega_{ср}$ вычисляется в среде имитационного моделирования с использованием методов численного интегрирования.

Отклонения осредненной угловой скорости ПС от задаваемой в установившемся режиме при наличии сбоя МК БУП для различных режимов работы ИЭП сведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 следует, что во всех рассмотренных режимах работы ИЭП при длительностях сбоя МК БУП от 10 мс до 30 мс отклонения средней на интервале осреднения 1 с угловой скорости ПС от задаваемой не превышают максимально допустимых значений. При длительности сбоя, равной 40 мс, и задаваемой скорости, равной 30°/с, наблюдается нарушение требования по точности отработки скорости вращения ПС.

Переходные процессы, полученные в результате моделирования ИЭП при различных значениях длительности сбоя МК ИУП и задаваемой скорости вращения ПС, равной 30°/с, приведены на рис. 11–14.

Из полученных графиков следует, что при выбранных параметрах регулятора сбой МК ИУП вызывает переходные процессы по скорости и углу поворота ПС, при этом максимальные отклонения значений угловой скорости и

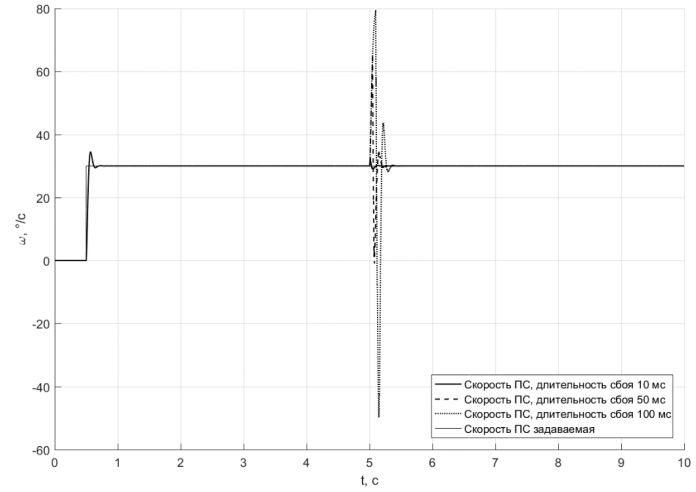


Рис. 11. Переходные процессы по скорости вращения ПС при сбое МК ИУП, ω_0=30°/с, $\omega_{КА}$=0°/с (общий вид)

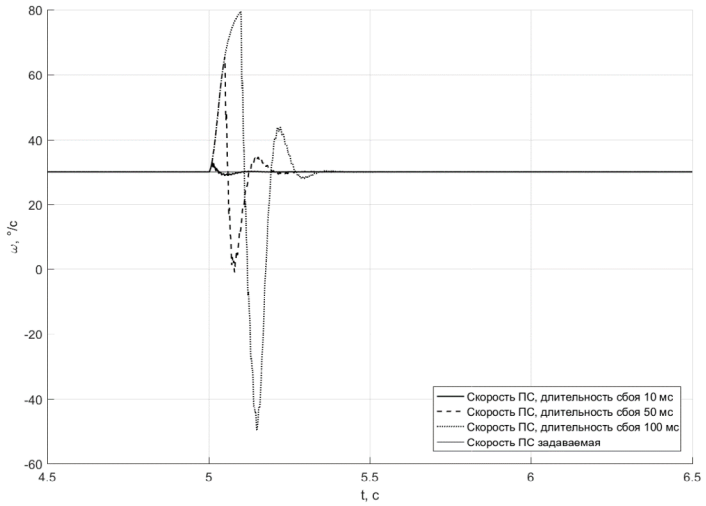


Рис. 12. Переходные процессы по скорости вращения ПС при сбое МК ИУП, ω_0=30°/с, $\omega_{КА}$=0°/с (увеличенный масштаб)

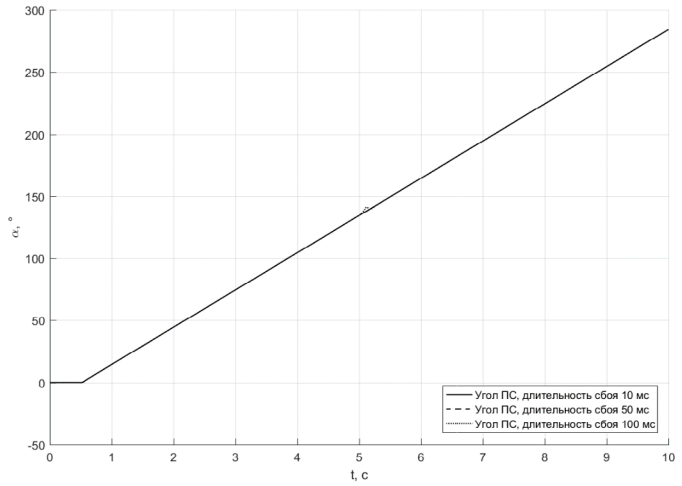


Рис. 13. Переходные процессы по углу поворота ПС при сбое МК ИУП, ω_0=30°/с, $\omega_{КА}$=0°/с (общий вид)

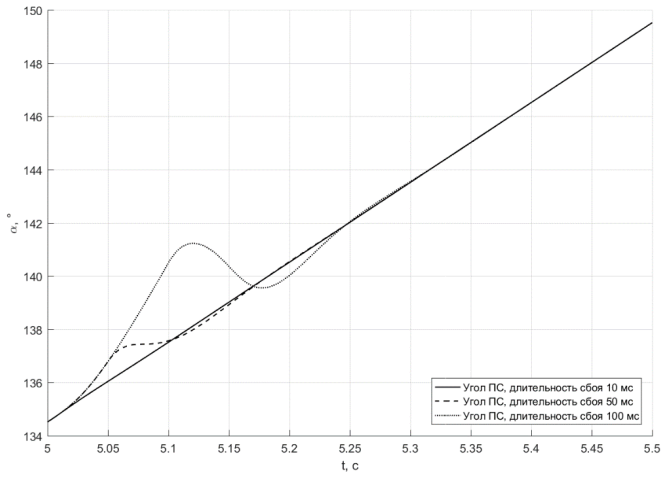


Рис. 14. Переходные процессы по углу поворота ПС при при сбое МК ИУП, ω_0=30°/с, $\omega_{КА}$=0°/с (увеличенный масштаб)

угла поворота ПС от задаваемых, а также значения времени возникающих после сбоя переходных процессов возрастают с увеличением длительности сбоя.

В случае сбоя МК ИУП длительностью 100 мс и задаваемых угловых скоростях вращения ПС ω_0=30°/с существенно нарушается плавность регулирования углового положения ПС (угловая скорость ПС принимает отрицательные значения, соизмеримые со значением ω_0, при выходе системы из режима сбоя).

Отклонения осредненной на интервале осреднения 1 с угловой скорости ПС от задаваемой в установившемся режиме при наличии сбоя МК ИУП, определенные с использованием интегрального критерия для различных режимов работы ИЭП, сведены в табл. 2 (обозначения в табл. 2 совпадают с таковыми в табл. 1).

Таблица 2

Отклонения средней угловой скорости ПС при сбое МК ИУП

Режим ИЭП	$t_{сб}$, мс	Δω, °/с	$\Delta\omega_{max}$, °/с
$\omega_{ПС}$=30°/с, $\omega_{КА}$=0 °/с	10	0,005	0,5
	50	0,005	
	100	0,005	
$\omega_{ПС}$=30°/с, $\omega_{КА}$=2 °/с	10	0,005	
	50	0,005	
	100	0,005	
$\omega_{ПС}$=30°/с, $\omega_{КА}$=-2 °/с	10	0,005	
	50	0,004	
	100	0,005	

Из данных табл. 2 следует, что во всех рассмотренных режимах работы ИЭП отклонение средней на интервале осреднения 1 с угловой скорости ПС от задаваемой не превышает максимально допустимых значений в диапазоне длительности сбоя МК ИУП от 10 до 100 мс. Учитывая результаты оценки точности отработки заданной угловой скорости вращения ПС, а также необходимость обеспечения плавности регулирования углового положения ПС, при различных значениях длительности сбоя МК ИУП, можно сделать вывод, что длительность сбоев МК ИУП не должна превышать 50 мс.

Таким образом, в результате проведения оценки влияния сбоев МК БУП и МК ИУП на работу ИЭП установлено, что сбои МК БУП и МК ИУП в установившемся режиме приводят к возникновению переходных процессов по скорости и углу поворота ПС, при этом максимальные отклонения скорости и угла поворота ПС от задаваемых значений с увеличением длительности сбоя возрастают. Определены максимальные допускаемые значения длительности сбоя МК БУП и МК ИУП, до достижения которых выполняются требования по точности отработки угловой скорости вращения ПС и плавности регулирования углового положения ПС:

1) максимальное допускаемое значение длительности сбоя МК БУП $t_{сб\ МК\ БУП\ max}$ = 30 мс;

2) максимальное допускаемое значение длительности сбоя МК ИУП $t_{сб\ МК\ ИУП\ max}$ = 50 мс.

Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшей разработке ИЭП, включающей в себя выбор и настройку микроконтроллера, входящего в состав БУП и ИУП.

Библиографический список

1. *Якимовский Д. О., Положенцев Д. С., Джукич Д. Й.* Исполнительный электропривод перспективного силового гироскопического комплекса // Доклады ТГУСУР. 2018. Том 21, № 3. С. 103–109.

2. *Якимовский Д. О., Положенцев Д. С.* Повышение чувствительности исполнительного электропривода силового гироскопического комплекса при отработке малых скоростей вращения // Завалишинские чтения'18. Сб. докл. СПб.: ГУАП, 2018. С. 119–124.

3. *Положенцев Д. С., Джукич Д. Й., Якимовский Д. О.* Исполнительный электропривод перспективного силового гироскопического комплекса // Электронные и электромеханические устройства: тезисы докладов научно-технической конференции молодых специалистов (Томск, 12–13 апреля, 2018 г.). Томск: АО «НПЦ «Полюс», 2018. С. 155–157.

4. *Смирнов А. В., Сорокин Л. Н., Сасункевич А. А.* Сбои в работе микроконтроллера при воздействии импульсных электрических помех // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2022. Вып. 4. С. 253–254.

5. *Пилипенко А. С.* Экспериментальная оценка сечений одиночных сбоев в различных функциональных блоках микроконтроллера при воздействии быстрых нейтронов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2023. Ном. 2. С. 18–23.

6. Проектирование исполнительного электропривода силового гироскопического комплекса с повышенными требованиями по обеспечению заданных скоростей вращения / Д. С. Положенцев [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19, № 3. С. 31–38.

УДК 004.056.55 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-206-208**

В. А. Рындюк*
кандидат технических наук, доцент
В. В. Данилова*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДАННЫХ В КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Статья посвящена применению квантовой криптографии для защиты данных в киберфизических системах, где традиционные методы шифрования, такие как RSA – криптографический алгоритм с открытым ключом и ECC – шифрование на основе эллиптических кривых, становятся уязвимыми перед квантовыми атаками. Исследованы протоколы BB84 и B92, выявлены их достоинства и недостатки, а также проанализированы возможности применения постквантовых алгоритмов в энергетических и промышленных системах.
Ключевые слова: *квантовая криптография, киберфизические системы, безопасность данных, квантовые вычисления, протокол BB84, постквантовая криптография, квантовое распределение ключей.*

V. A. Ryndyuk*
PhD, Tech., Associate Professor
V. V. Danilova*
Student
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

APPLICATION OF QUANTUM CRYPTOGRAPHY TO DATA PROTECTION IN CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

The article is devoted to the application of quantum cryptography for data protection in cyber-physical systems, where traditional encryption methods, such as RSA – a public-key cryptographic algorithm and ECC – elliptic curve encryption, become vulnerable to quantum attacks. The BB84 and B92 protocols are studied, their advantages and disadvantages are identified, and the possibilities of using post-quantum algorithms in energy and industrial systems are analyzed.
Keywords: *quantum cryptography, cyber-physical systems, data security, quantum computing, BB84 protocol, post-quantum cryptography, quantum key distribution.*

Киберфизические системы интегрируют цифровые и физические процессы, что делает их незаменимыми для управления критически важной инфраструктурой – от энергосетей до транспортных систем и медицинских устройств. С одной стороны, цифровизация этих систем повышает эффективность и автоматизацию, с другой – увеличивает риск кибератак и утечек данных. Традиционные криптографические методы, такие как RSA – криптографический алгоритм с открытым ключом и ECC – шифрование на основе эллиптических кривых, которые долгое время считались надежными, теряют свою эффективность в условиях появления квантовых компьютеров. Квантовые вычисления, способные решать задачи факторизации и дискретного логарифма, ставят под угрозу безопасность данных, шифруемых этими методами.

В таких условиях квантовая криптография, основанная на законах квантовой механики, становится перспективным решением для защиты информации. Она не только обеспечивает безопасность шифрования, но и позволяет обнаружить попытки перехвата данных. В данной статье рассматриваются принципы квантового шифрования, его алгоритмы и перспективы их использования в киберфизических системах, а также ключевые угрозы.

Киберфизические системы объединяют цифровые компоненты для управления физическими процессами и широко применяются в энергетике, промышленности, транспорте и здравоохранении. Несмотря на их эффективность, та-

кие системы подвержены различным киберугрозам, включая перехват данных, манипуляции устройствами и даже физическое воздействие через их цифровую часть.

Традиционные методы криптографической защиты, такие как криптографический алгоритм с открытым ключом и алгоритмы Диффи – Хеллмана, обеспечивают надежность благодаря вычислительной сложности задач факторизации и дискретного логарифма, что делает их устойчивыми к атакам классических компьютеров. Однако с развитием квантовых вычислений эти методы становятся уязвимыми. Алгоритм Шора позволяет квантовым компьютерам разложить большие числа на множители за полиномиальное время, что представляет угрозу для методов шифрования с открытым ключом [2, с. 231].

Эти уязвимости открывают злоумышленникам доступ к зашифрованной информации, которая ранее считалась надежно защищенной, что создает серьезные риски для киберфизических систем, зависящих от безопасности передачи данных.

Рассмотрим преимущества квантовой криптографии. Квантовая криптография обеспечивает безопасность данных за счет принципов квантовой механики, главным образом используя принцип неопределенности Гейзенберга. Это позволяет мгновенно фиксировать любое вмешательство в процесс передачи данных: изменение состояния квантовых частиц указывает на попытку перехвата информации [4, с. 127].

Протокол BB84, разработанный в 1984 г., является одним из самых известных методов квантовой криптографии. Он использует фотоны с различными состояниями поляризации для передачи данных, причем эти состояния организованы в два базиса. Протокол позволяет обнаруживать попытки перехвата данных, так как любое вмешательство в процесс передачи приводит к изменениям в состоянии фотонов, что делает невозможным перехват данных без их разрушения и является его большим достоинством. Протокол B92, разработанный позже, использует два состояния и является более простым в реализации, но менее защищенным от атак [4, с. 128–129].

Одним из ключевых преимуществ квантовой криптографии является защита от атак типа «человек посередине». Любая попытка вмешательства немедленно фиксируется, что позволяет участникам передачи остановить обмен до утечки информации [1].

Применение квантовой криптографии в киберфизических системах обеспечивает надежную защиту данных, особенно при передаче между устройствами и системами. Одним из главных инструментов является квантовое распределение ключей, которое позволяет устройствам обмениваться криптографическими ключами через открытые каналы связи без риска их перехвата. Это возможно благодаря использованию квантовых частиц, таких как фотоны, которые меняют свои свойства при любом вмешательстве, что делает попытки перехвата данных легко обнаружимыми [2, с. 232].

В условиях реального времени, когда киберфизические системы требуют постоянного и безопасного обмена данными, квантовая криптография играет ключевую роль в предотвращении несанкционированного доступа. Например, в энергетических сетях, где сбои могут привести к серьезным последствиям, квантовая криптография помогает предотвращать аварии и обеспечивает надежность работы системы [3, с. 9]. Уже сегодня технология квантового распределения ключей начинает внедряться в промышленные системы для защиты данных, передаваемых между удаленными узлами сети.

Постквантовая криптография также играет значимую роль в обеспечении безопасности промышленных систем. Данная криптография представляет собой новое поколение криптографических алгоритмов, устойчивых к атакам с использованием квантовых компьютеров. Эти алгоритмы основаны на сложных математических преобразованиях, инвертирование которых сложно как для классических, так и для квантовых систем. Их применение для передачи и хранения данных существенно увеличивает защиту информации с долгим жизненным циклом, более 5 лет.

Постквантовые алгоритмы усиливают традиционные методы шифрования, не заменяя их. Например, такие решения, как алгоритмы на основе сетевых задач или многомерных решеток, демонстрируют высокую устойчивость к квантовым атакам и могут эффективно сочетаться с квантовой криптографией, особенно в киберфизических системах.

Примером надежного постквантового алгоритма является AES – симметричный алгоритм блочного шифрования, который показал высокую устойчивость даже к ускоренному процессу подбора ключей с использованием квантовых компьютеров. Взлом симметричного алгоритма блочного шифрования требует огромных вычислительных ресурсов, что делает его эффективным для защиты в условиях квантовых угроз. Таким образом, симметричные шифры продолжают оставаться важным элементом постквант-

товой криптографии, особенно в сочетании с новыми квантово-устойчивыми решениями [4].

Применение квантовой криптографии активно развивается в различных отраслях. Например, в финансовом секторе квантовое распределение ключей уже используется для защиты транзакций и обмена конфиденциальной информацией между банками. Системы квантового распределения ключей обеспечивают высокий уровень безопасности за счет того, что любые попытки вмешательства в процесс передачи данных немедленно фиксируются.

В будущем квантовая криптография может быть адаптирована для использования в киберфизических системах, где безопасность данных играет ключевую роль. В частности, энергетические сети, промышленные установки и системы здравоохранения могут использовать квантовую криптографию для защиты данных в реальном времени [4].

Кроме того, квантовая криптография дополняет традиционные методы, обеспечивая новые уровни безопасности благодаря физическим принципам, которые невозможно преодолеть с помощью квантовых вычислений. Это создает дополнительную линию защиты для киберфизических систем, особенно в контексте критически важных инфраструктур.

Квантовая криптография – перспективный метод защиты данных, особенно для киберфизических систем, таких как энергетические сети. Ее главное преимущество – способность обнаруживать вмешательства в передачу данных, что делает ее эффективнее традиционных методов. Несмотря на высокие затраты, ее внедрение оправдано долгосрочной безопасностью. Постквантовые алгоритмы продолжают играть важную роль, обеспечивая устойчивость к квантовым атакам. В будущем квантовая и постквантовая криптография станут работать совместно, создавая многоуровневую защиту для киберфизических систем и критически важных данных.

Библиографический список

1. *Бабенко Л. К., Ищукова Л. К.* Криптографическая защита информации: симметричное шифрование: учебное пособие для вузов. М.: Юрайт, 2021. 220 с.

2. *Баланов А. Н.* Защита информационных систем. Кибербезопасность: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2024. 280 с.

3. *Голубчиков Д. М., Румянцев К. Е.* Квантовая криптография: Принципы, протоколы, системы. Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2020. 37 с.

4. *Долгочуб Е. А., Поликанин А. Н.* Анализ квантовых алгоритмов шифрования BB84 и B92. Новосибирск: СГУГиТ, 2020. С. 125–129.

УДК 681.5(07) **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-209-211**

А. В. Статкевич*
старший преподаватель
В. Ф. Шишлаков*
доктор технических наук, профессор
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СИНТЕЗ СТАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

В данной работе рассмотрен регулятор с переменной структурой, предназначенный для управления объектами, имеющими не менее двух положений равновесия, одно из которого всегда не устойчивое.
Ключевые слова: *статический регулятор, скользящее движение, система с переменной структурой.*

A. V. Statkevich*
Senior Lecturer
V. F. Shishlakov*
Dr. Sc. Tech., Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SYNTHESIS OF STATIC REGULATOR WITH VARIABLE STRUCTURE

This paper considers a variable-structure controller designed to control objects having at least two equilibrium positions, one of which is always unstable.
Keywords: *static controller, sliding motion, system with variable structure.*

Линейный способ управления не всегда позволяет удовлетворительно управлять процессами химическими, металлургическими, ядерной энергетики и др. Объясняется это тем, что в ряде случаев при наиболее выгодных технологических режимах положения равновесия (особые точки) в фазовом пространстве могут располагаться вблизи начала координат. При этом некоторые особые точки оказываются неустойчивыми при любых значениях параметров регулятора. В результате наличия таких неустойчивых особых точек вблизи начала координат область начальных значений, в которой удается обеспечить устойчивость процесса регулирования с помощью линейных законов управления, оказывается мало. В связи с этим появляется задача применения новых способов регулирования.

В данной статье рассматривается линейный регулятор с применением переменной структуры. Линейный регулятор, используемый для управления термохимическими процессами, где технологические параметры зависят от внутренних координат, не может обеспечить устойчивость в широком диапазоне изменения параметров системы. При увеличении точности регулирования параметров диапазон устойчивости системы уменьшается из-за увеличения статического коэффициента усиления регулятора [1].

На рис. 1 представлена функциональная схема автоматического регулирования со статическим регулятором переменной структуры.

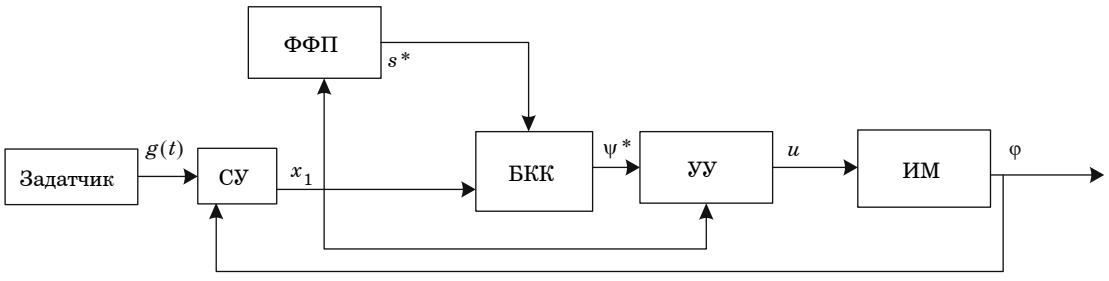


Рис. 1. Функциональная схема автоматического регулирования со статическим регулятором переменной структуры

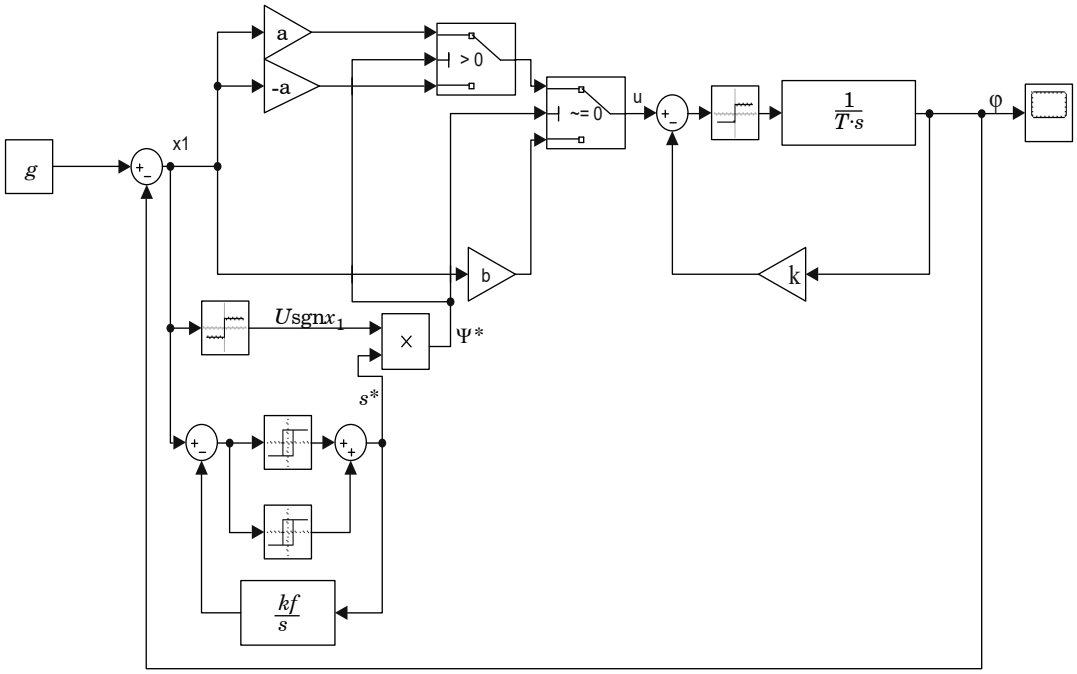


Рис. 2. Структурная схема линейного регулятора с переменной структурой

Другими словами, этот контроллер может увеличить диапазон стабильной работы, регулируя начальные условия и эффективно управляя скоростью изменения температуры с помощью статической составляющей с высоким коэффициентом усиления, что приводит к точному регулированию желаемого параметра.

Схема включает в себя задатчик, управляющее устройство (УУ) регулятора, который состоит из блока сравнивающего устройства (СУ), выделяющего ошибку x_1, блока формирователя функции переключения (ФФП), формирующего некоторую функцию переключения s^*, и блока коммутируемых коэффициентов (БКК) [2], и исполнительного механизма (ИМ).

В БКК реализуется логический закон коммутации коэффициента усиления ψ^*:

$$\psi^* = \begin{cases} \alpha \text{ при } s^* x_1 > 0, \\ \beta \text{ при } s^* x_1 = 0, \\ -\alpha \text{ при } s^* x_1 < 0, \end{cases}$$

где α и β – постоянные величины.

Управляющее воздействие на выходе УУ формируется в виде [3]:

$$u = \psi \cdot x_1.$$

Функция переключения s^* формируется с помощью релейного формирующего устройства по следующему логическому закону:

$$s^* = \begin{cases} 1 \begin{cases} x_1 - k_\phi \int s^* dt > \dfrac{\varepsilon}{2} + \Delta, \\ \dfrac{\varepsilon}{2} + \Delta \ge x_1 - k_\phi \int s^* dt \ge \dfrac{\varepsilon}{2}, \text{ если } s^* = 1, \end{cases} \\ 0 \begin{cases} -\dfrac{\varepsilon}{2} < x_1 - k_\phi \int s^* dt < \dfrac{\varepsilon}{2}, \\ \dfrac{\varepsilon}{2} + \Delta \ge x_1 - k_\phi \int s^* dt \ge \dfrac{\varepsilon}{2}, \text{ если } s^* = 0, \\ -\left(\dfrac{\varepsilon}{2} + \Delta\right) \le x_1 - k_\phi \int s^* dt \le -\dfrac{\varepsilon}{2}, \end{cases} \\ -1 \begin{cases} x_1 - k_\phi \int s^* dt < -\left(\dfrac{\varepsilon}{2} + \Delta\right), \\ -\left(\dfrac{\varepsilon}{2} + \Delta\right) \le x_1 - k_\phi \int s^* dt \le -\dfrac{\varepsilon}{2}, \\ \text{если } s^* = -1, \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

где k_ϕ – постоянная величина.

На рис. 2 представлена структурная схема линейного регулятора с переменной структурой с исполнительным механизмом, которая реализована по логическому закону, описанному в (1).

Этот логический закон обеспечивает высокую точность поддержания регулируемой координаты φ в статическом регуляторе с переменной структурой независимо от поставленной задачи. Он эффективно компенсирует увеличение коэффициента усиления статического регулятора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Библиографический список

1. *Емельянов С. В.* Системы автоматического управления с переменной структурой. М.: Наука, Главн. ред-ия физ.-мат. лит., 1967. 336 с.

2. *Статкевич А. В., Шишлаков В. Ф.* Системы с переменной структурой на примере скользящего режима работы // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: XXVII Междунар. науч. конф. (СПб., 3–7 июня 2024 г.): сб. статей: в 3 ч. Ч. 3. СПб.: ГУАП, 2024. 329 с.

3. *Статкевич А. В.* Синтез системы управления летательным аппаратом при нестационарности параметров // Датчики и системы. № 4 (276).

УДК 004.9.62.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-212-215**

С. Г. Фомичева*
кандидат технических наук, профессор
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ БЕЗОПАСНЫХ КОНВЕЙЕРОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Рассмотрены инновационные методологические подходы к разработке систем искусственного интеллекта с защищенным программным обеспечением. Приведены результаты сравнительного анализа методологий разработки безопасных конвейеров машинного обучения.
Ключевые слова: *информационная безопасность, системы искусственного интеллекта, конвейер машинного обучения, интегрированные механизмы безопасности.*

COMPARATIVE ASPECTS OF THE DEVELOPMENT FOR SECURE MACHINE LEARNING PIPELINES

S. G. Fomicheva*
PhD, Tech., Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

Innovative methodological approaches to the development of artificial intelligence systems with secure software are considered. The results of a comparative methodologies analysis for developing secure machine learning pipelines are presented.
Keywords: *information security, artificial intelligence systems, machine-learning pipeline, integrated security mechanisms.*

Традиционные методологические подходы к разработке сложного программного обеспечения базируются на последовательном выполнении этапов планирования, проектирования, разработки, интеграции и тестирования программного обеспечения. Такой подход, будучи хорошо методически проработанным, тем не менее обладает недостатками в контексте разработки систем искусственного интеллекта. Во-первых, стадии конвейеров машинного обучения и традиционного программного обеспечения принципиально отличаются. Во-вторых, последовательный процесс слишком медленен с точки зрения ожиданий рынка на запрос об обновлении интеллектуальных компонент, входящих в состав систем искусственного интеллекта. В-третьих, при последовательном процессе вопросы обеспечения информационной безопасности рассматриваются, как правило, на заключительных этапах, что приводит к позднему выявлению критических уязвимостей, требующих существенного перепроектирования архитектуры и структур данных.

С целью ускорения вывода на рынок своей продукции компании переходят на использование методологий DevOps [1], ориентированной на микросервисные архитектуры, позволяющие обеспечить легкую заменимость, масштабируемость и независимость сервисов, использовать легковесные протоколы взаимодействия между сервисами, а также распределить процесс разработки ПО между разными командами. Для обеспечения непрерывного внедрения механизмов защиты в ПО методология DevOps была усовершенствована и стала называться DevSecOps [1–3]. В рамках DevSecOps команды прорабатывают вопросы безопасности во время планирования и начинают тестирование проблем безопасности в средах разработки, а не ожидают ее окончания, добиваясь тем самым раннего обнаружения и нивелирования уязвимостей исходного кода. В итоге DevSecOps снижает риск развертывания программного обеспечения с неправильными настройками и другими уязвимостями [3]. Однако принципиальные отличия (табл. 1) в стадиях конвейера машинного обучение (software 2.0 [4]) и конвейера традиционного программного обеспечения (software 1.0)) не позволяют эффективно использовать традиционные механизмы защиты в системах искусственного интеллекта.

Таблица 1

Отличительные признаки поколений программного обеспечения

Сравнительная характеристика	Традиционное ПО (Software 1.0)	AI = Software 2.0
Принцип функционирования	Фиксированная программная логика	Динамическое обучение / дообучение ML-модели
Рабочий процесс	Выполнение команд, в соответствии с алгоритмом	Вынесение решений на основе функциональности ML-модели
Принцип взаимодействия	Графический/ консольный интерфейс (UI)	Когнитивный интерфейс (Cognitive UI) с использованием многомодальных компонент (изображения, видео, звук, текст)
Основные проблемы безопасности	Некорректная валидация (improper validation) Проблемы контроля доступа (access control issues) Некорректные системные конфигурации	Манипуляции (manipulations), Эксфильтрации (exfiltrations), Инъекции/отравления датасетов и/или ML-моделей (Injection/Poison dataset & model)

Темпы внедрения интеллектуальных компонент в конвейеры машинного обучения (ML-конвейеры) опережают способность IT-служб обеспечить их безопасность. Основные причины, осложняющие возможность обеспечить безопасность ML-конвейеров, объясняются специфическими особенностями процессов машинного обучения как таковых. Среди них следует выделить следующие:

1) Процесс машинного обучения – это процесс, основанный на данных. Его цель – автоматически выявить закономерности в исходных данных для решения конкретной (как правило, оптимизационной) задачи. Результат обучения (знания) сохраняется в виде параметров ML-модели (например, взаимосвязанных весов нейросетевых ML-моделей). Следовательно, к качеству собираемых исходных данных (датасетов большого объема), предъявляются высокие требования, включая требования к их целостности и конфиденциальности. Отравление данных (несанкционированная модификация) в датасетах и их кража – обычная практика злоумышленников.

2) При взаимодействии с ИСиС по каналам связи информация передается не только в традиционной форме – в виде данных и/или сигналов, но и в виде ML-моделей, являющейся одной из форм представления знаний (knowledge model) [5]. Концептуальные принципы обеспечения конфиденциальности и целостности данных и знаний не совпадают [6]. Обеспечивать безопасность знаний, как правило, сложнее, во-первых, в силу необходимости перманентного обновления знаний (например, при обучении ML-модели) и коллапсирования знаний при попытках их некорректного сегментирования, во-вторых, требованию сохранения их возможной активации на пути миграции [7] Отравление ML-модели и ее кража – также цель (даже более предпочтительная) для злоумышленника. Следовательно, механизмы защиты ML-моделей должны быть интегрированы в саму модель и/или ML-конвейер.

3) Состояние обученной ML-модели, введенной в эксплуатацию (Inference ML-model), требуется непрерывно контролировать в силу неизбежной деградации ее производительности – с течением времени точность прогнозов, выдаваемых ML-моделью, падает по объективным причинам (из-за изменения распределений исходных данных – дрейфа данных, и из-за изменения зависимостей в реальном мире между входными данными и целевыми значениями – дрейф концепции), а также по причинам злонамеренных атак на интеллектуальные компоненты [8, 9] – датасеты, ML-модели, ML-конвейеры, ML-сценарии.

Эти перечисленные особенности вводят в ML-системы набор уникальных векторов атак, с которыми традиционные модели безопасности не справляются. Кроме того, агент угрозы теперь может представлять из себя вредоносную программную сущность особого класса – генеративную ML-модель, которой свойственны возможности самоадаптации и состязательного обучения (как такой агент угроз формирует свои источники данных, на которых он обучается, а также каковы каналы связи, по которым он мигрирует, и цели атаки предсказать очень сложно). Это вызов для всех специалистов кибербезопасности.

Если для создания, развертывания и эксплуатации безопасного и защищенного традиционного программного обеспечения (Software 1.0) используются хорошо известные техники DevSecOps, в ресурсный состав которых входят необходимые верифицированные библиотеки, в том числе, с реализацией криптографических алгоритмов, то для Software 2.0 лишь прорабатываются техники MLSecOps, ориентированные на поэтапную интеграцию защитных механизмов на всем жизненном цикле ML-конвейера.

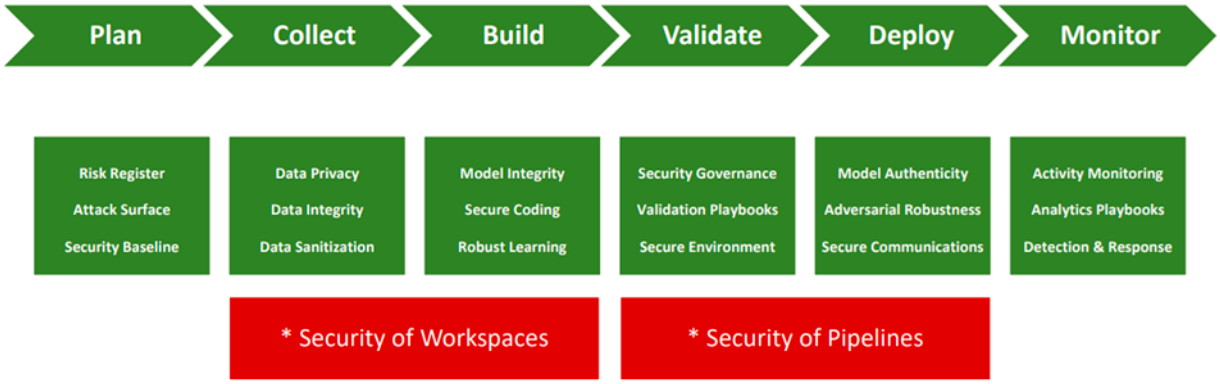


Рис. 1. Конвейер MLSecOps

Таблица 2

Сравнение стадий жизненного цикла создания безопасных приложений

№	Стадия	DevSecOps	MLSecOps
1.	Определение требований безопасности (ТБ)	Выполняется на начальных этапах проектирования и планирования	Выполняется на начальных этапах проектирования и планирования
2.	Определение показателей (KPI) и отчетности о соответствии требованиям	KPI фиксируют минимально приемлемый уровень качества безопасности разрабатываемых компонент и системы в целом	KPI фиксируют минимально приемлемый уровень качества безопасности разрабатываемых компонент и системы в целом
3.	Разработка модели угроз безопасности информации	Моделирование угроз выполняется на уровне компонентов, приложения или системы	Моделирование угроз выполняется на уровне ML-компонентов, приложения или системы
4.	Установка требований к проектированию механизмов безопасности	Прорабатываются требования к криптографическим примитивам и протоколам, способам аутентификации, логированию исключений и событий безопасности	Прорабатываются требования к криптографическим примитивам и протоколам, способам аутентификации, логированию исключений и событий безопасности
5.	Определение и использование стандартов криптографии в соответствии с требованиями регуляторов	Стандарты введены в действие	Стандарты прорабатываются регуляторами (представлены в предварительных национальных стандартах)
6.	Управление риском безопасности, связанным с использованием сторонних компонентов	Верификация сторонних компонентов, включая open source исходный код	Верификация сторонних компонентов, включая open source исходный код, датасеты и baseline модели
7.	Использование одобренных политикой безопасности инструментов проектирования и администрирования	Использование доверенных фреймворков разработки ПО	Использование доверенных фреймворков машинного обучения
8.	Обеспечение надежности и прозрачности искусственного интеллекта	Не проводится	ML-системы должны быть прозрачными, справедливыми и подотчетными как внутренним заинтересованным сторонам, так и внешним пользователям
9.	Состязательное машинное обучение	Не проводится	Проводится периодически
10.	Выполнить тестирование безопасности исходного кода (статический – SAST и динамический анализ – DAST	Проводится перед вводом продукта в эксплуатацию	Методики тестирования автоматически сгенерированного исходного кода не определены
11.	Оценка уязвимости цепочки поставок компонентов ПО	Оценка уязвимости цепочки поставок компонентов ПО	Оценка уязвимости цепочки поставок ПО и ML-компонентов
12.	Оценка безопасности создания и эволюции ML-моделей на протяжении всего их жизненного цикла	Не проводится	Должно проводиться непрерывно, методики прорабатываются
13.	Провести тестирование на проникновение (Pen Testing)	Используются команды Red Team	Используются команды Red Team
14.	Установить процесс реагирования на инциденты и их разбор	Используются SIEM, UEBA, NAT, TE, SOAR	Используются SIEM, UEBA, NAT, TE, SOAR

Регуляторные требования и технологические решения MLSecOps находятся в стадии становления как в Российской Федерации, так и за рубежом. Криптографические алгоритмы для ML-моделей требуют усовершенствования. Как видно из рис. 1, встраивание механизмов защиты (в том числе криптографических), проводится поэтапно, начиная с механизмов обеспечения целостности (Integrity), конфиденциальности (Privacy) данных, затем – модели, окружения, коммуникаций с последующим мониторингом каждой характеристики безопасности.

В табл. 2 приведены результаты сравнительного анализа стадий методологий DevSecOps и MLSecOps, которые определены на текущий момент времени.

В качестве вывода следует подчеркнуть, что практически невозможно изначально создать ML-конвейер без механизмов защиты, ввести модель в эксплуатацию, а затем добиться ее полноценной защиты. Следует обратить внимание, что должна быть обеспечена не только безопасность ML-конвейеров (Secure of pipelines), но и безопасность ИИ-инфраструктуры (Secure of Workspace), где накапливаются датасеты, разрабатывается и обучается ML-модель.

Библиографический список

1. Сравнение DevSecOps и DevOps. URL: https://www.microsoft.com/ru-ru/security/business/security-101/what-is-devsecops#devsecops-vs-devops (дата обращения: 14.11.2024).

2. *Беззатеев С. В., Жемелев Г. А., Фомичева С. Г.* Исследование производительности платформ AutoML при конфиденциальных вычислениях // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2024. № 3 (61). С. 109–126.

3. *Беззатеев С. В., Фомичева С. Г., Супрун А. Ф.* Повышение эффективности мультиагентных систем информационной безопасности методами постквантовой криптографии // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 4. С. 71–88.

4. *Pinto M. V.* Software 2.0: The Evolution of Coding as We Know It. URL: https://networkencyclopedia.com/software-2-0-the-evolution-of-coding-as-we-know-it/ (дата обращения: 14.11.2024).

5. ГОСТ Р 57309–2016 Руководящие принципы по библиотекам знаний и библиотекам объектов. URL: https://rosgosts.ru›file/gost/35/240/gost_r_57309-2016.pdf (дата обращения: 14.11.2024).

6. *Фомичева С. Г.* Теоретические аспекты квантования баз знаний в мультиагентных системах // Информационно-управляющие системы. 2017 (Information and control systems) 88(3). 2–10. DOI:10.15217/issnl6848853.2017.3.2

7. MLSecOps by Protect AI. The MLSecOps Community, Inc – 2024. URL: https://mlsecops.com/ (дата обращения: 14.11.2024).

8. *Fomicheva S., Bezzateev S.* Modification of the Berlekamp-Massey algorithm for explicable knowledge extraction by SIEM-agents. 2022. J. Phys.: Conf. Ser. 2373 052033.

9. *Фомичева С. Г., Беззатеев С. В.* Механизмы защиты моделей машинного обучения от состязательных атак. T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 10. С. 28–42.

УДК 681.511 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-216-219**

С. К. Шорохов*
студент
А. Г. Панкратов*
студент
Н. В. Решетникова*
старший преподаватель
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В работе рассмотрено применение метода компенсации для достижения инвариантности системы относительно возмущающего воздействия. Приведен вывод передаточной функции для компенсатора по каналу ошибки.
Ключевые слова: *система управления, внешнее воздействие, возмущение, компенсатор.*

S. K. Shorokhov*
Student
A. G. Pankratov*
Student
N. V. Reshetnikova*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

APPLICATION OF THE COMPENSATION METHOD IN AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

The paper uses the compensation method to achieve the invariance of the system with respect to the disturbing effect. The output of the transfer function for the compensator via the error channel is given.
Keywords: *control system, external impact, disturbance, compensator.*

В современном мире системы автоматического управления (САУ) играют ключевую роль в обеспечении эффективности и надежности технологических процессов. Они широко применяются в различных областях промышленности, транспорте, энергетике и других сферах деятельности человека. Основной задачей САУ является поддержание заданных значений параметров системы (температура, давление, скорость и т. д) с целью обеспечения требуемого качества регулирования [1].

В САУ в основном применяются три фундаментальных принципа управления: разомкнутое управление, компенсация внешних возмущений (управление по возмущению), управление по отклонению (метод обратной связи) [2]. Наиболее популярным и эффективным методом является использование управления с помощью обратной связи, однако если возмущающие воздействия настолько велики, что замкнутая цепь не может обеспечить требуемые характеристики управления, то дополнительно используют метод компенсации [3–4]. С помощью метода компенсации в систему вводятся дополнительные обратные связи, которые позволяют достичь требуемых показателей качества характеристик. Впоследствии САУ, нечувствительные к внешним возмущениям, названы инвариантными [5].

Так, в работе [6] рассматривается физический подход к построению систем управления на основе компенсации динамики объекта и возмущений. Автор предлагает использовать метод компенсации для решения задачи управления многомерной системой. Суть подхода заключается в построении обратной модели объекта управления по каналам управления, определении влияния внешних возмущений, в том числе ненаблюдаемых, их фильтрация и подача на соответствующие координаты обратной мо-

дели. Тем самым достигается инвариантность выходной величины относительно возмущающих воздействий.

В работе [7] рассматривается решение задачи синтеза закона управления движением морского судна при воздействии на него ограниченных внешних возмущений. Для компенсации внешних возмущений автор использует метод, основанный на применении инвариантных эллипсоидов. Предложенный алгоритм позволяет компенсировать ограниченные внешние воздействия с учетом требований к степени устойчивости и длительности переходного процесса.

В статье [8] приводится синтез закона управления движением двухколесного робота с помощью метода компенсации в условии внешних возмущений. Авторы рассмотрели метод компенсации динамики объекта и возмущений, данный метод позволяет отрабатывать внешние воздействия с точностью до фильтров-эталонов.

Таким образом, метод компенсации позволяет синтезировать законы управления при сильных внешних воздействиях с обеспечением требуемой точности к качеству регулирования.

Общий вид системы управления с возмущающим воздействием $F(s)$ представлен на рис. 1.

При нулевом входном воздействии $G(s)=0$ система будет описываться следующим образом [8]:

$$\begin{cases} X_1(s) = W_{\text{рег}}(s) W_{\text{Оу}}(s) E(s), \\ X_2(s) = W_{\text{воз}}(s) F(s), \\ E(s) = -Y(s), \\ Y(s) = X_1(s) + X_2(s). \end{cases} \quad (1)$$

Выражая систему (1) относительно возмущающего воздействия $F(s)$, можно получить:

$$E(s) = -W_{\text{рег}}(s) W_{\text{Оу}}(s) E(s) - W_{\text{воз}}(s) F(s),$$

$$W_{\text{воз}}(s) F(s) = -E(s)\left(1 + W_{\text{рег}}(s) W_{\text{Оу}}(s)\right).$$

Очевидно, что для обеспечения инвариантности такой системы необходимо, чтобы

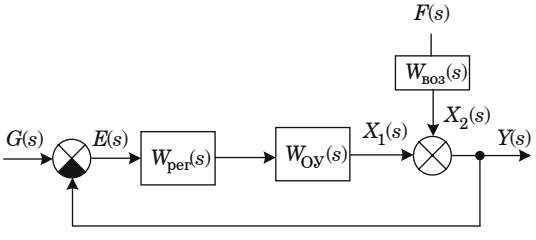


Рис. 1. Система управления с возмущающим воздействием

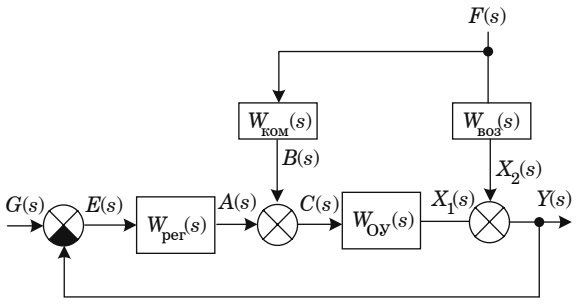


Рис. 2. Инвариантная система относительно возмущающего воздействия

$W_{\text{воз}}(s)=0$. Практического смысла это не имеет, так как это будет означать, что внешнее воздействие отсутствует. Для обеспечения инвариантности системы относительно возмущающего воздействия необходимо ввести дополнительную компенсирующую связь (рис. 2).

Устройство, стоящее в дополнительной обратной связи и обеспечивающее инвариантность системы, часто называют компенсатором. Для расчета передаточной функции компенсатора $W_{\text{ком}}(s)$ можно записать систему системы при нулевом входном воздействии $G(s)=0$ [8]:

$$\begin{cases} X_1(s) = W_{\text{Оу}}(s) C(s), \\ X_2(s) = W_{\text{воз}}(s) F(s), \\ A(s) = W_{\text{рег}}(s) E(s), \\ B(s) = W_{\text{ком}}(s) E(s), \\ C(s) = A(s) + B(s), \\ E(s) = -Y(s), \\ Y(s) = X_1(s) + X_2(s). \end{cases} \quad (2)$$

Выражая систему (2) относительно возмущающего воздействия, можно получить:

$$E(s) = -W_{\text{Оу}}(s) C(s) - W_{\text{воз}}(s) F(s) =$$
$$= -W_{\text{Оу}}(s) W_{\text{рег}}(s) E(s) - W_{\text{Оу}}(s) \times$$
$$\times W_{\text{ком}}(s) F(s) - W_{\text{воз}}(s) F(s),$$
$$F(s)\left(W_{\text{Оу}}(s) W_{\text{ком}}(s) + W_{\text{воз}}(s)\right) =$$
$$= -\left(1 + W_{\text{Оу}}(s) W_{\text{рег}}(s)\right) E(s).$$

Тогда для достижения инвариантности необходимо:

$$W_{\text{Оу}}(s) W_{\text{ком}}(s) + W_{\text{воз}}(s) = 0.$$

Отсюда следует, что передаточная функция компенсатора равна:

$$W_{\text{ком}} = -\frac{W_{\text{воз}}(s)}{W_{\text{Оу}}(s)}. \quad (3)$$

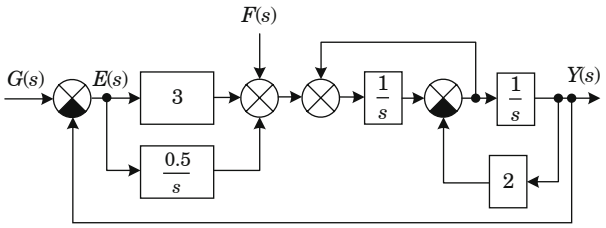


Рис. 3. Система управления с ПИ-регулятором

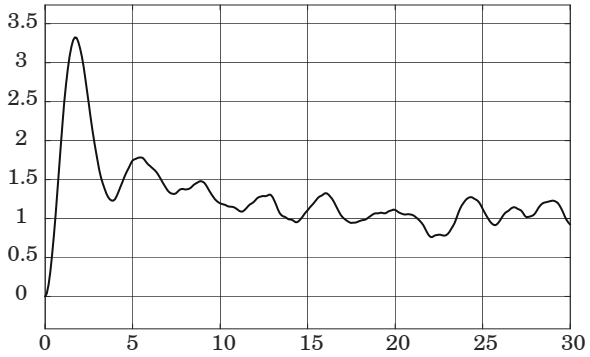


Рис. 4. Реакция системы на входное и возмущающее воздействие

В качестве примера можно рассмотреть систему с ПИ-регулятором, представленную на рис. 3.

В качестве внешнего воздействия рассматривается случайный гауссовский шум. Переходный процесс системы представлен на рис. 4.

Для достижения инвариантности системы относительно возмущающего воздействия вводится дополнительная обратная связь (рис. 5).

Тогда, исходя из формулы (3), передаточная функция компенсатора:

$$W_{\text{ком}}(s) = -\frac{s}{3s + 0.5}.$$

На рис. 6 представлен график переходного процесса в системе с компенсационным регулятором.

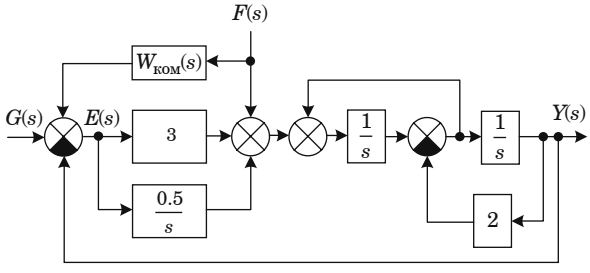


Рис. 5. Система с компенсатором

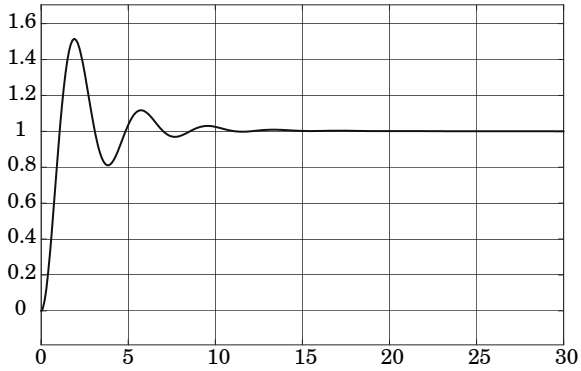


Рис. 6. Реакция системы с компенсатором на входное и возмущающее воздействие

Исходя из графиков, представленных на рис. 4 и 6, можно сделать вывод, что компенсатор позволяет достичь полную инвариантность выходной величины системы относительно возмущающего воздействия. Таким образом, метод компенсации может использоваться при синтезе широкого класса САУ для достижения требуемых характеристик системы. Комбинированное управление объединяет достоинства обоих принципов – быстроту реакции на изменение возмущений и точное регулирование. Также на базе метода компенсации при неизменной структуре регулятора может быть реализовано робастное управление [9].

Библиографический список

1. *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1996. 992 с.

2. *Ким Д. П.* Теория автоматического управления. Том 1. Линейные системы: учебник. М.: Физматлит, 2007. 312 с.

3. *Зайцев А. П.* Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2000. 152 с.

4. Современные методы проектирования систем автоматического управления. Анализ и синтез / Под ред. Б. Н. Петрова, В. В. Солодовникова, Ю. И. Топчеева. М.: Машиностроение, 1967.

5. *Петров Б. Н.* Принцип инвариантности при расчете линейных и нелинейных систем // Труды I Конгресса ИФАК. М.: Изд-во АН СССР. 1961.

6. *Шадрин Г. К.* Физический подход к построению систем управления на основе компенсации динамики объекта и возмущений //Автоматика и телемеханика. 2016. №. 7. С. 33-46.

7. *Смирнов М. Н.* Динамическая компенсация ограниченных внешних возмущений в системе стабилизации курса судна // Навигация и управление движением: Материалы XV конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 2013 г. / Научный редактор: О. А. Степанов, под общей редакцией В. Г. Пешехонова. СПб.: Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2013. С. 364-370. EDN RVYHIH.

8. *Бураков М. В.* Теория автоматического управления: учебное пособие. Часть 1. СПб.: ГУАП, 2013. 256 с.

9. *Поляк Б. Т., Щербаков П. С.* Робастная устойчивость и управление[Текст]. М.: Наука, 2002.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 004.422.81+004.422.83+004.624 DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-220-223

В. Е. Белай*
инженер
М. С. Романова**
старший преподаватель
О. Б. Чернышева**
старший преподаватель
А. П. Мастеров**
ассистент
**НПФ «Полисервис»*
***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАТЧИКА ОСВЕЩЕННОСТИ TEMT6000 ПРИ РАБОТЕ С ФРЕЙМВОРКОМ ESPRESSIF

В данной статье рассматривается алгоритм разработки программного обеспечения при работе с датчиком освещенности TEMT6000, управляемым отладочной платой ESP32-DEVKITC-V4. Рассмотрены особенности инициализации аналогово-цифровых портов на фреймворке ESPRESSIF.
Ключевые слова: *ESP, ESPRESSIF, TEMT6000, АЦП, микроконтроллер.*

V. E. Belay*
Engineer
M. S. Romanova**
Senior Lecturer
O. B. Chernysheva*,*
Senior Lecturer
A. P. Masterov**
Assistant
**LLC "Polyservice"*
*** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

FEATURES OF USING THE TEMT6000 LIGHT SENSOR WHEN WORKING WITH THE ESPRESSIF FRAMEWORK

This article discusses the software development algorithm when working with the TEMT6000 light sensor controlled by the ESP32-DEVKITC-V4 debugging board. The features of initialization of analog-digital ports on the ESPRESSIF framework are considered.
Keywords: *ESP, ESPRESSIF, TEMT6000, ADC, microcontroller.*

Датчики освещенности используются для регулирования параметров света в различных интеллектуальных системах управления освещением [1], управления затемнением подсветки ЖК-дисплеев смартфонов и подсветки клавиатуры мобильных устройств [2].

Датчик освещенности TEMT6000 представляет собой кремниевый эпитаксиальный плоский фототранзистор с npn-переходом в миниатюрном прозрачном корпусе типоразмера 1206 (SMD) для поверхностного монтажа. Максимальная чувствительность датчика достигается при 570 нм [2].

Так как системы измерения освещения могут интегрироваться в различные системы интернета вещей, можно использовать систему уровней архитектуры интернета вещей [3]. В рамках данной статьи будут рассмотрены физический уровень (Physical Layer) при приеме значений с датчика освещенности и уровень перифе-

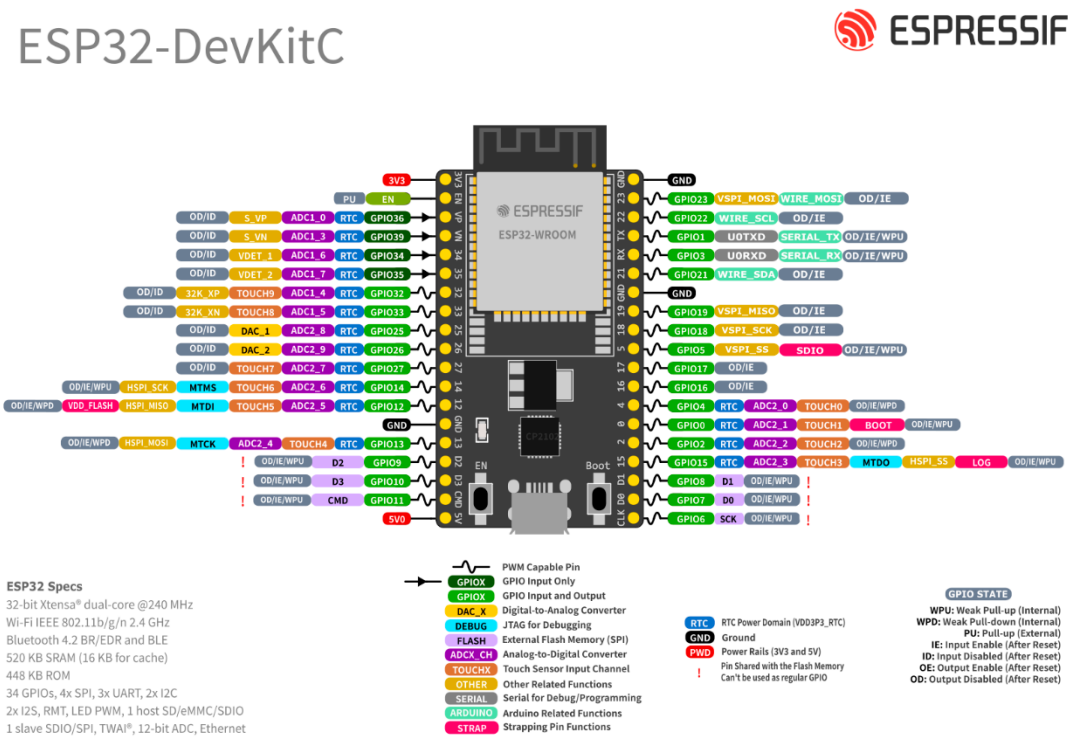


Рис. 1. Распиновка отладочной платы ESP32-DevKitC-V4 [4]

рийного вычисления (Edge Layer) при оцифровке значений, поступающих на аналогово-цифровые порты микроконтроллера.

В основе системы контроля освещением лежит отладочная плата ESP32-DevKitC-V4 с микроконтроллером ESP32-WROOM-32U, представленная на рис. 1. Микроконтроллер ESP32-WROOM-32U имеет два ядра RTC и APP, 2 канала АЦП и ЦАП, выводы ШИМ, I2C, I2S, UART, SPI [4].

Для получения значения освещенности требуется снять значение с вывода датчика TEMT6000 [5]. В микроконтроллере ESP32-WROOM-32U интегрирован 12-битный аналогово-цифровой преобразователь. В качестве входного порта будет использоваться ADC1_7.

Для получения характеристики напряжения в цифровом виде необходимо выполнить расчет согласно формуле:

$$U = \frac{U_{ADC} \times 5}{2^{12}},$$

где U – текущее значение напряжения на порте ADC1_7, U_{ADC} – значение напряжения, считываемое на порте ADC1_7.

Процентное соотношение текущего значения напряжения на порте к максимальному значению в процентах рассчитывается по формуле:

$$U_{\%} = \frac{U_{ADC} \times 100}{2^{12}},$$

где $U_{\%}$ – значение напряжения в процентах от максимально возможного значения.

Текущее значение тока, протекающего в цепи датчика TEMT6000:

$$I = \frac{U}{R_{SMD}},$$

где I – значение тока, протекающего в цепи датчика освещенности TEMT6000, R_{SMD} – значение сопротивления подтягивающего резистора датчика TEMT6000.

Значение освещенности в люксах рассчитывается по формуле:

$$E_v = I \times 2,$$

где E_v – значение освещенности в люксах, I – значение тока в микроамперах.

Исполняемая программа на фреймворке ESPRESSIF может разрабатываться на языках программирования C и C++. Для данной статьи рассматривается пример программы управления, разработанной на языке программирования C.

Общую программу [5] следует разделить на несколько частей:

Рис. 2. Структурная схема программы

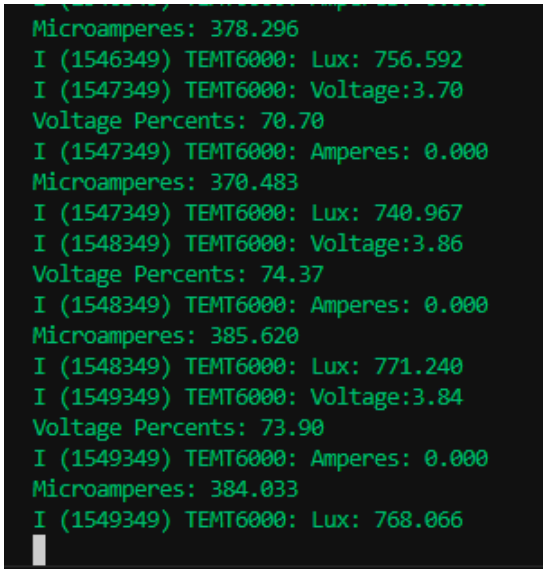


Рис. 3. Информационные логи

1) Добавление библиотек:

– стандартные библиотеки языка C: stdio, stdlib;

– библиотеки freertos: FreeRTOS и task;

– библиотеки драйверов esp driver: gpio, adc;

– библиотеки вывода логов по UART: esp_log.

2) Определение константных значений для обозначения пользовательского тэга вывода информационного сообщения и определения используемого канала АЦП.

3) *Определение пользовательских функций* [6]:

– считывания значений с датчика и преобразования полученного значения на порте АЦП в люксы;

– вывода значений, содержащей информационные макросы ESP_LOGI.

4) Определение главной функции программы.

Главная функция программы состоит из:

1) вызова конфигурационных API-функций АЦП [6] для:

– настройки ширины захвата первого канала АЦП;

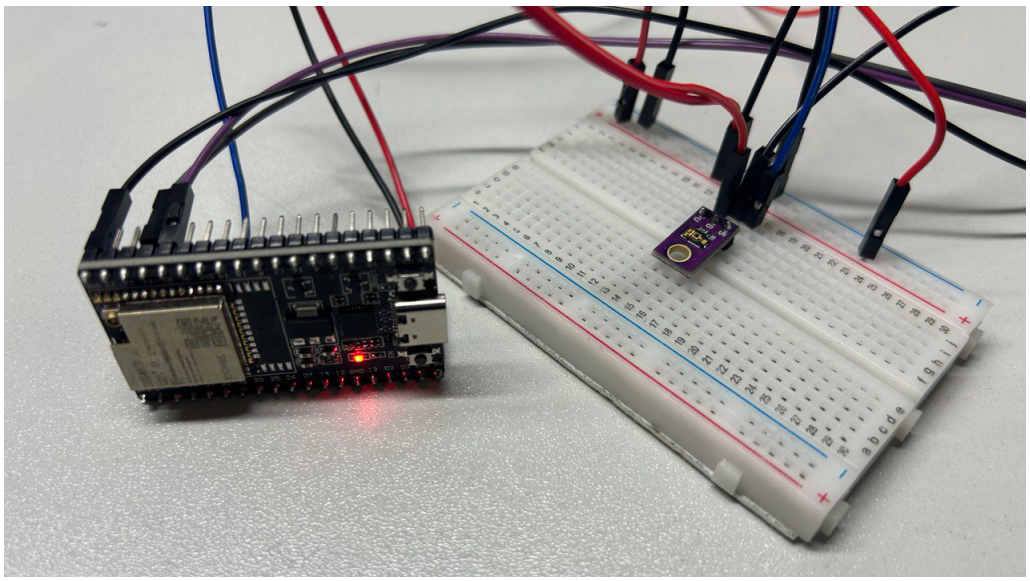


Рис. 4. Общий вид системы контроля освещения

– установки затухания первого канала АЦП и конфигурации мультиплексора на выводе GPIO 35;

2) инициализации переменных для записи параметров напряжения, тока и люксов датчика освещенности;

3) основного цикла программы, в котором производится снятие и вывод значений с заданием пользовательской задержки.

Структурная схема программы приведена на рис. 2.

Информационные сообщения передаются посредством UART. В результате работы программы в терминале среды разработки выводятся информационные логи с параметрами, представленные на рис. 3.

При максимальном значении освещенности значение тока достигает значения почти до 500 мА. При минимальном значении освещенности фототранзистор запирается, и ток в цепи датчика перестает протекать.

Общий вид системы контроля освещенности приведен на рис. 4.

Данную систему можно дополнить различными комбинациями, в которых могут присутствовать источники света, реагирующие на минимальные значения освещения.

В дальнейших исследованиях планируется к уже разработанной системе добавить ЦАП-порты для контроля яркости источников света в зависимости от значения освещенности.

Библиографический список

1. Светодиодная интеллектуальная система освещения на базе датчика освещенности TEMT6000 / Р.Р. Умутбаев [и др.] // Фундаментальные и прикладные разработки в области технических и физико-математических наук. 2018. С. 58–60.

2. Технические характеристики датчика освещенности TEMT6000 от производителя Vishay Semiconductors. URL: https://www.vishay.com/docs/81579/temt6000.pdf (дата обращения: 25.11.2024).

3. Формирование архитектуры системы интернета вещей / А. П. Мастеров [и др.] // Инновационное приборостроение. 2023. Том 2, номер 5. С. 32–42.

4. ESPRESSIF. ESP32-DevKitC. ESP32-DevKitC-V4. URL: https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32/esp32-devkitc/user_guide.html (дата обращения: 25.11.2024).

5. Программа по считыванию значений с датчика TEMP6000. URL: https://github.com/belvasevg/esp_examples/tree/master/ESP-IDF/ESP32-WROOM-32U/ADC/TEMP6000 (дата обращения: 25.11.2024).

6. ESPRESSIF. API Reference. Peripherals API. Analog to Digital Converter. URL: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v4.3.1/esp32c3/api-reference/peripherals/adc.html (дата обращения: 25.11.2024).

УДК. 658.562 – 621.317.7 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-224-230**

А. П. Бобрышов*
аспирант
С. Ю. Лач*
аспирант
С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
В. П. Кузьменко*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ КАЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОЦЕНКИ ПОВЕРКИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Качество квалифицируется как параметр, описывающий сочетание свойств, признаков, процессов, действий, мероприятий и услуг, характеризующих способность соответствовать установленным требованиям и удовлетворять в достаточной мере заявленные потребности и запросы. Исследованием и измерением параметра качества и его представления в количественной мере занимается наука квалиметрия. Существует большое количество математических аппаратов, описывающих и оценивающих исследуемый объект, метод или процесс. В контексте проведения мероприятий поверки электрических контрольно-измерительных приборов качественной оценкой является соответствие установленной точности прибора и условий проведения аттестации. Авторы данной статьи исследуют требования, предъявляемые к мероприятиям проведения поверки, условия и причины возможного искажения результатов измерения, а также рассматривают математически метод оценки достоверности аттестации как определение качества не только процедуры тестирования, но и самого измерительного прибора.
Ключевые слова: *качество, соответствие точности, оценка, поверка электрический контрольно-измерительный прибор, условия, качественные показатели, стандарт.*

A. P. Bobryshov*
PhD Student
S. Y. Lach*
PhD Student
S. V. Solyonyj*
PhD, Tech., Associate Professor
V. P. Kuzmenko*
PhD, Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ANALYSIS OF QUALITATIVE PARAMETERS OF EVALUATION OF VERIFICATION AND ELECTRICAL TEST AND MEASUREMENT INSTRUMENTS

Quality is qualified as a parameter describing a combination of properties, attributes, processes, actions, activities and services that characterize the ability to meet the established requirements and satisfy sufficiently the stated needs and demands. Research and measurement of the quality parameter and its representation in quantitative measure is engaged in the science of qualimetry. There is a large number of mathematical apparatuses that describe and evaluate the object, method or process under study. In the context of verification of electrical test and measurement devices, qualitative assessment is the compliance of the established accuracy of the device and the conditions of certification. The authors of this article investigate the requirements for verification activities, conditions and causes of possible distortion of measurement results, and also consider mathematically the method of assessing the validity of certification, as a determination of the quality not only of the testing procedure, but also of the measuring device itself.
Keywords: *quality, conformity of accuracy, evaluation, verification electrical control and measuring device, conditions, quality indicators, standard.*

Введение

Государственными стандартами параметр качества трактуется как степень соответствия совокупности присущих характеристик установленным требованиям [1]. Таким образом, оценкой качества исследуемого процесса или объекта является анализ и учет отдельных показателей в совокупности. Экспертный анализ играет важную роль в оценке, основой определения параметра являются количественные измеряемые показатели и оценки, описывающие исследуемый процесс или объект. Исходя из стандарта, показатель качества может применяться к таким характеристикам, как плохое, хорошее и превосходное и т. п. Стоит отметить, что классификация обусловлена разделению по количественному показателю, при этом мера оценки может изменяться, в зависимости от характеристик исследуемого процесса или объекта. Учет и разделение параметров, характеризующих единый показатель качества, играет не менее важную роль чем каждый отдельный показатель или количество анализируемых характеристик. Стоит понимать, что методы могут быть построены на анализе определенного параметра, например, квалиметрические модели позволяются непосредственно оценить качество, но существуют модели оценивающие параметры, которые определяются как соответствие качеству, таким образом можно сделать вывод, что результаты таких математических аппаратов также можно трактовать и использовать, как параметры качества, например оценка точности измерительного оборудования.

Поверка как мероприятие оценки качества электрического измерительного устройства и аттестации

Рассматривая процесс осуществления поверки электрических контрольно-измерительных приборов (КИП) можно сказать, что соответствие установленным требованиям проведения аттестации определяет качество выполняемого процесса. Учитывая присвоенную точность каждому отдельному измерительному прибору, определяющему строгие количественные границы, в том числе для проведения оценки и аттестации, а также предъявляемых требований и условий поверки, можно говорить об осуществлении качественной оценки аттестационных мероприятий. Как правило, итогом поверки КИП является вычисление показателей погрешности измерений, как каждого отдельного замера, так и среднего значения результатов тестирования. Проведение аттестации электрических измерительных устройств осуществляется согласно определенно установленным условиям окружающей среды и параметров аппаратуры проведения измерений. Данный факт связан с исключением влияний внешних воздействий на измерения проводимые в период поверки, к влияющим параметрам относят температуру окружающей среды, относительную влажность воздуха, атмосферное давление, вибрацию, магнитное поле и частоту [2]. Стоит также отметить влияние поверочной аппаратуры и питающей электросети, а именно дозы фликера, в большей степени исключение влияния параметров сети обеспечивает сама аппаратура, организовывая стабильные показатели электропитания для установления наиболее точных измерительных величин [3]. При проведении аттестации практически невозможно обеспечить соответствие установленным требованиям в динамике испытаний, именно поэтому с стандартах предусмотрены коэффициенты, нивелирующие влияние вышеописанных параметров и формулы учета веса, как отдельной влияющей величины, так и нескольких в совокупности. Выход составляющей аппаратной погрешности и отклонений условий аттестации от нормальных, а также установленных интервалов, регламентируется стандартом. Таким образом суммарное отклонение не может составлять более 35% от установленного предела допускаемой погрешности или 50% от предела допускаемого основной погрешностей применяемого образцового средства измерений, для случаев отличия нормальных условий аттестации. Методика расчета весов влияния условий на поверку может применяться в квалиметрических моделях оценки качества проведения поверки, достоинством является учет измерительных показаний, непосредственно характеризующих проводимую аттестацию, а не экспертная оценка. Данный факт свидетельствует о наиболее высокой точности учета параметров, что определяется, как качественная характеристика, отражающаяся на итоговом качестве проведения аттестации.

В течение поверки электрических КИП сложно поддерживать все предписанные условия окружающей среды. При этом отклонение описанных параметров может носить абсолютно разный характер и природу проявления. В теории погрешности существует широкая линейка классификации отклонений, например вычислительного выражения, к ним относятся главные отклонения, по которым производится итоговая оценка электрического измеритель-

ного устройства, абсолютные относительные и приведенные [2, 4]. Также погрешности классифицируются по проявлению, например, грубые систематически и случайные. Изменение условий эксплуатации можно отнести к случайным отклонениям, систематическим или динамическим в любом случае род выявления остается по проявлению. Данные искажения не только учтены и определены в заданных рамках, но и могут быть исключены в следствии подбора корректного коэффициента. Все описанные параметры непосредственно влияют как на качество проводимых измерений, так и на качество общей поверки электрических КИП. Но существуют погрешности, влияние которых в достаточной мере оценить проблематично, например методические, инструментальные, субъективные и вероятностные. Искажение условий проведения поверки можно отнести к случайным, поскольку установить причину, характер и тенденцию изменений условий не всегда представляется возможным. При этом не всегда удается зарегистрировать данные отклонения, что определяет невозможность учета данных искажений в принципе при обработке результатов. Систематические и грубые погрешности, ввиду особенности проявления, могут быть исключены с использованием математических методов [7]. В любом случае, результатом обработки данных проведения аттестации электрических измерительных приборов является присвоение годности или негодности прибора, в зависимости от итоговых величин среднего значения погрешности и каждого отдельного отклонения измерения, превышения установленной точности или нет. Данный параметр в целом характеризует исключительно точность прибора, при этом недостаточно корректно отражая качество операции аттестации. Конечно, итоговое численное значение погрешности можно рассмотреть с точки зрения квалиметрии и произвести качественную оценку проводимой поверки, при этом учесть методы расчета весовых характеристик, представленных в правилах и описанных выше.

Анализ материальной базы параметров, определяющих качество аттестации

Рассмотреть аттестацию электрических КИП возможно с точки зрения вероятности и статистики. Государственный стандарт обеспечения единства измерений достоверности и требований к методике поверки устанавливает номенклатуру параметров методики рассмотрения результатов поверки с точки зрения вероятности [5]. Стоит отметить, что при рассмотрении погрешности с точки зрения вероятности производится учет анализируемых данных с точки зрения статистики и динамики изменения. Стандартом приводятся методика аттестации и выявлении параметра оценки достоверности проведенной аттестации на основе результатов поверки. Оценочными критериями устанавливаются, наибольшая вероятность ошибочного признания годным дефектного измерительного устройства, наибольшая вероятность ошибочного признания дефектным годного прибора, отношение модуля наибольшей возможной характеристики погрешности к пределу допускаемых значений, наибольшая средняя, для совокупности годных КИП, вероятность признания дефектным годного устройства. Результатом данного анализа является итоговая вероятность принятия измерительного устройства годным и показатели ошибки первого рода, ложного непринятия и второго рода, принятия негодного измерительного устройства аттестованным. Данный анализ является наиболее обширным с точки зрения оценки показателя качества проводимой аттестации, при этом является универсальным, поскольку используется единая шкала оценки, изначально учитывающая паспортную точность измерительного устройства.

Первоначально стоит определиться со входными параметрами и характеристиками, для расчета показателей вероятности необходимо установить статистический закон распределения погрешности измерения. Поскольку отклонения распределяются случайным образом в определенном диапазоне, при этом допустимые отклонения результатов измерения характеризуются различными проявлениями, можно рассматривать данную величину, как случайную. Рассматривая специфику работы КИП в целом, можно утверждать, что несмотря на отклонения все измерения находятся в определенном диапазоне и стремятся к определенному единому значению, которым не всегда может быть нулевое. При этом показатели погрешностей могут принимать, как положительные, так и отрицательные значения, и подавляющее большинство величин попадает в интервал близкий к пиковому лимитированному значению. Данная характеристика и свойство подходят под нормальный закон распределения. Стоит отметить, что данный закон распределения является наиболее распространенным в технике и строительстве и наиболее часто применяется в оценке распределения погрешностей [6]. С точки зрения оценки точности и учитывая интервальный ха-

рактер задачи данного параметра для электрических КИП, описываемый закон удовлетворяет все описанные условия. Конечно, существует равномерный закон распределения, который также имеет место в описании погрешностей измерений. Но учитывая особенность проявления отклонений измерительных приборов и характеристику данного закона в виде равномерных расположений величин в заданном диапазоне можно сказать, что распределение величин в таком формате является в большей степени частным идеальным случаем. Примером являются грубые и случайные погрешности, которые могут не вписываться в условия равномерности, а наоборот нарушать их своим проявлением. В подтверждение выбора для анализа качества аттестации нормального закона распределения, приводится требования стандарта на многократные измерения, где основным законом для оценки поверки приводится нормальный [7]. В ранних версиях госта применялось требование, «при отсутствии данных о виде распределения случайных величин их распределения принимают за равномерные».

Метод оценки параметров вероятности аттестации электрических контрольно-измерительных приборов

В качестве основных расчетных соотношений стандартом на единства измерений достоверности и требований к методике поверки устанавливаются:

$$P(x) = \int_{-\gamma}^{\gamma} \varphi(\frac{\bar{x}}{x}) d\,\bar{x};$$

$$P_{gr} = \beta - \int_{0}^{\beta} P(x)dx;$$

$$\delta_M = P^{-1}(x);$$

$$P_d = P(x);$$

В данных выражениях:

– P_x – определяется, как вероятность признания поверяемого прибора годным, данный параметр является основной при построении характеристики вероятности или оперативной характеристики поверки;

– x – это контролируемая характеристика определяющая вероятность аттестации измерительного устройства;

– x – это плотность распределения вероятности нормализованной оценки;

– φ – функция плотности распределения исследуемой погрешности;

– y – абсолютное значение границ заданного интервала поля контрольного допуска;

– P_{gr} – наибольшая средняя вероятность ошибочного признания дефектным годного прибора;

– β – нормализованная граница контроля или наиболее оптимальное граничное значение исследуемой погрешности;

– b_{M} – это параметр отношения модуля наибольшей погрешности к пределу допускаемых значений;

– P_{d} – наибольшая вероятность ошибочного признания годным дефектного КИП.

Для вычисления вероятности определенной величины, подчиняющейся нормальному закону распределения, можно воспользоваться интегралом Лапласа. Для этого необходимо вычислить значения числителя и знаменателя данного выражения, при этом для электрических КИП необходимо учитывать заданную точность прибора. Числитель можно представить, как отношение средней погрешности прибора к максимально допустимой погрешности исследуемого измерительного устройства. Знаменатель, как отношение значений лимитированного значения или среднего, к которому стремятся результаты измерения, к максимально допускаемой погрешности. В теории вероятности согласно представленному описанию лимитированного среднего значения, соответствует среднеквадратическое отклонение, как величина наиболее распространенная, в качестве показателя рассеивания значений случайной величины. Таким образом для нахождения данного параметра изначально необходимо определить дисперсию, являющейся мерой разброса результатов измерений. Стоит отметить, что точность, т. е. качество данного показателя, зависит от количества случайных величин, или в нашем случае измерений, таким образом для различного количества анализируемых параметров используются различные формулы расчета дисперсии [8]:

$$D_{n\geq 20} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_{cp})^2$$

$$D_{n<20} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_{cp})^2;$$

В данной формуле x_i – это погрешности результатов измерений, а $x_{\text{ср}}$ – это среднее значений погрешностей измерений. При этом для определения дисперсии среднего значения измерений, необходимо данный параметр разделить на количество замеров, в таком случае

формула расчета среднеквадратического отклонения выглядит следующим образом:

$$S = \sqrt{\frac{D}{n}};$$

Погрешность показаний прибора, с учетом максимально допустимой погрешности по точности электрического КИП, в том числе в процентном эквиваленте вычисляется как:

$$T_{срэт} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_{iсрэт}}{n};\ T_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n};$$

$$T_{\Delta} = T_{срэт} - T_{ср};\ T_{разн} = \left| \frac{T_{\Delta} \cdot 100}{T_{срэт}} \right|.$$

Первое выражение определяет среднее значение измеряемой величины по всем измерениям эталона. Второе уравнение характеризует среднее значение погрешностей всех результатов измерений поверяемого электрического КИП. Третье выражение определяет разность между средними значениями измерений эталона и исследуемого прибора. Четвертое уравнение является погрешностью показаний прибора по среднему значению, показатель устанавливается по модулю, т. к. может получиться отрицательное число в результате разности в третьем уравнении. Как выше было описано, знаменатель интеграла определяется, как отношение лимитированного значения к максимально допускаемой погрешности, для реализации такого отношения необходимо перевести среднеквадратическое отклонение в качестве процентного эквивалента, по отношению к допускаемому значению точности:

$$S_{\%} = \frac{S \cdot 100\%}{T_{срэт}};\ S_{пред} = \frac{S \cdot 100\%}{T_m};$$

Первое уравнение описывает среднеквадратическое отклонение в процентах относительно эталонного измерителя, второе уравнение описывает отношение среднего отклонения прибора к максимально допускаемой погрешности исследуемого измерительного устройства, вычисляемой в зависимости от точности прибора.

Числитель аргумента вычисляется, как отношение погрешности показаний прибора по среднему значению к максимальной погрешности по точности исследуемого измерительного прибора. При этом стоит отметить, что реализуемая методика в большей степени является классическим построением графика распределения случайной величины, с отличием лишь в том, что в данном случае все показатели будут положительные, и интервал характеризует область в которые может попасть любое измерение прибора.

$$k = \frac{T_{разн}}{T_m};\ k_1 = 1 - k;\ k_2 = 1 + k.$$

Зависимости описывают аргументы функции распределения нормального закона для погрешностей исследуемых электрических КИП. Отношение описывают разброс измерений прибора, чем больше разность, тем больше разброс, что говорит о меньшей точности и меньшем показателе качества прибора. Сумма и разность устанавливают интервал значений в который попадают измерения. Данными уравнениями учтено главное соотношение, приведенное стандартом единства измерения, как вероятность признания поверяемого прибора годным. Следующим этапов является непосредственное вычисление вероятности через интегральную функцию Лапласа:

$$P(x) = f(k_1) - f(k_2).$$

Таким образом определяется среднее значение вероятности корректной аттестации измерительного прибора. Произведя вычисление $1 - P(x) = P_{\mathrm{gr}}$ как наибольшая вероятность ошибочного признания дефектным годного прибора. Показатель от 1 и выше до значения k_2 будет характеризоваться, как P_d, наибольшая вероятность ошибочного признания годным дефектного КИП. Итоговая характеристика прибора со средней погрешностью измерений, составляющей 1.1% для прибора 2.5% точности, представлена на рис. 1.

Стоит отметить, что, используя данную методику оценки качества проведения поверки и точности прибора через вероятность аттестации, помимо параметра достоверности аттестации получается установить данные ложной аттестации и неаттестации и интервалы в которые могут попасть измерения, при этом чем больше интервал аргументов, тем менее точный прибор и меньшее качество проводимой аттестации. В точке 1 по значению аргумента отношений точности, параметр вероятности всегда будет равен 0.5 ввиду особенностей вычисления аргументов. На рис. 2 представлены примеры характеристик приборов различной точности с паспортной в 2.5%.

В правой части графика описаны средние погрешности измерений в процентной эквиваленте поверенных электрических КИП. Можно

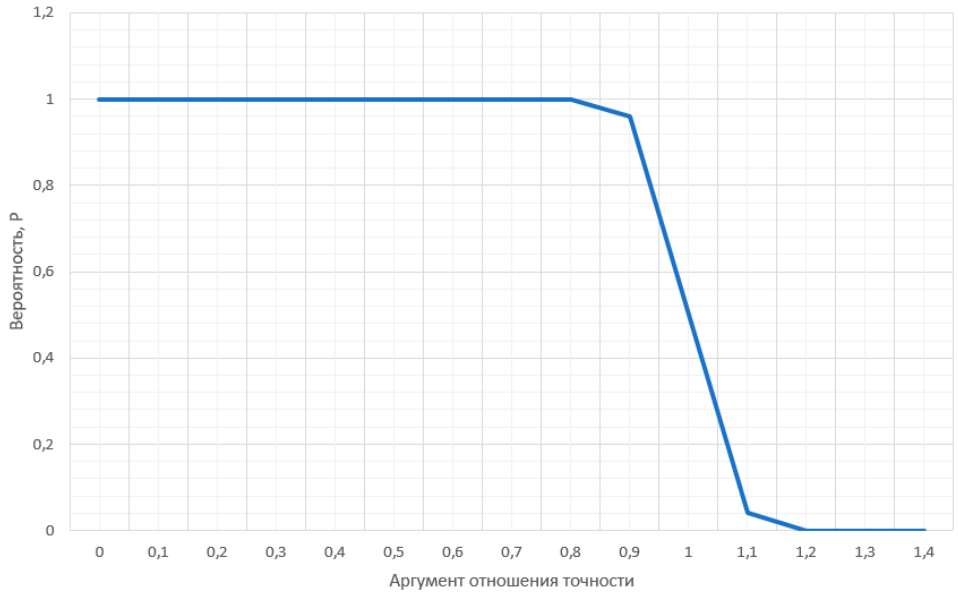


Рис. 1. Оперативная характеристика поверки электрического КИП

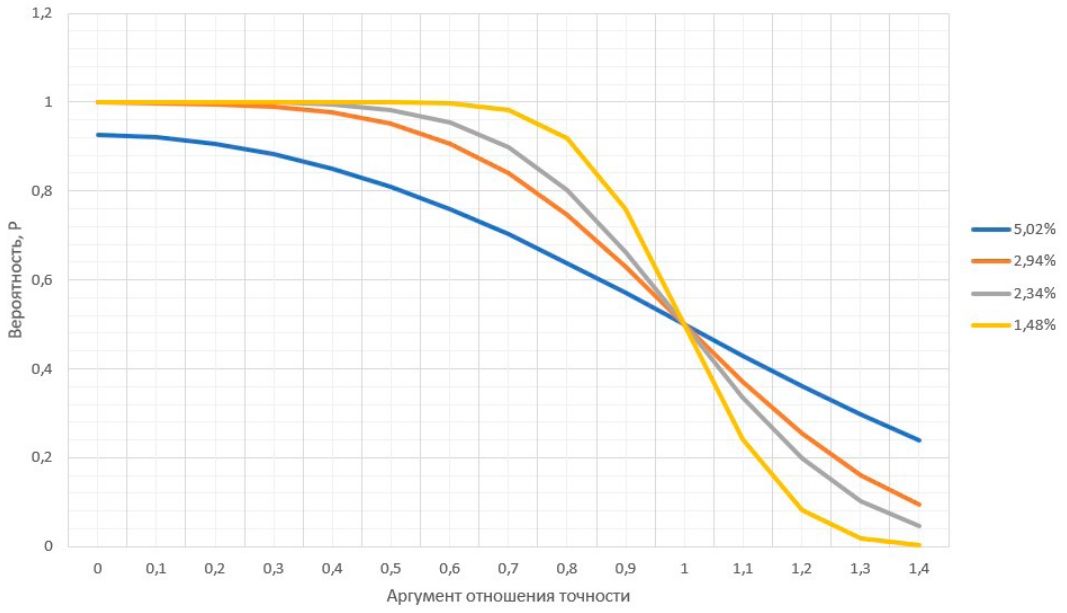


Рис. 2. Оперативная характеристика электрических КИП различной точности

отчетливо заметить, что чем меньше точность прибора, тем больший наклон имеет прямая, при этом увеличиваются разность аргументов, уменьшается вероятность достоверности поверки и повышаются вероятности ошибок первого и второго рода.

Параметр качества определяет соответствие установленным нормам и требованиям выполняемых задач, процедур или услуг, а также согласованность с установленными требованиям объектов и устройств. В контексте поверки электрических КИП, соответствие установленной точности и описание данного параметра определяет, как качество проведенной поверки, так и соответствие прибора установленным параметрам. Конечно, для качественной оценки самой аттестации больше подходят описанные условия соблюдения определенных стандартами условий проведения поверки, определение и по возможности исключения различно-

го рода и проявления погрешностей. Но не стоит забывать про математический аппарат, модели и методики оценивающие количественные показатели измерений и определяющиеся как качественные с точки зрения описания соответствия процесса и самого прибора установленным требованиям. В результате исследований и дополнительного анализа из представленной модели оценки достоверности, возможно выразить единый параметр, определяющий качество аттестации на основе описанных результатов, при этом существует необходимость провести дополнительные исследования в области влияния каждой отдельной величины. Данные исследования позволят произвести определение весовых характеристик исследуемых параметров, что непосредственно относится к задачам квалиметрии.

Заключение

Исследование математического метода проведения расчета параметров достоверности результатов поверки, однозначно можно отнести к качественной оценки. Данное заключение подтверждается обширным разнообразием итоговых результатов, описывающих не только соответствие установленной точности, но и определяющих интервалы значений и характеристику данного показателя, как максимального диапазона разброса значений измерений. Показатели ошибок первого и второго рода, так же характеризуют насколько приближенно к установленной точности находятся измерения прибора, что также описывает качество самого КИП. Оценка всех параметров в совокупности определяет наиболее широкую и информативную картину, что является важным условием в качественной оценке.

Библиографический список

1. ГОСТ Р ИСО 9000-2015 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 сентября 2015 г. № 1390-ст.

2. ГОСТ Р 8.656-2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений показателей качества электрической энергии. Методика поверки» Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 августа 2009 г. N 308-ст.

3. ГОСТ 8.395-80 «Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования» Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 28 июля 1980 г. N 3853 дата введения установлена 01.07.81 переиздание (по состоянию на апрель 2008 г.).

4. Основы теории погрешностей: учеб.-метод. пособие по курсу «Взаимозаменяемость и технические измерения» / сост.: А. Н. Неверов. М.: МАДИ, 2021. 58 с.

5. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для вузов / Б. Я. Авдеев [и др.]. Под ред. В. В. Алексеева. М.: Академия, 2007.

6. МИ 187-86 «Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Достоверность и требования к методикам поверки средств измерений» актуализирован 01.01.2021.

7. *Жуков В. К.* Теория погрешностей технических измерений. Томск, 2009. 180 с.

8. ГОСТ Р 8.736-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения» Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 1045-ст.

УДК 621.3 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-230-235**

А. Д. Горюнов*
студент
М. В. Сержантова*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕКЛОУЗЕРОВ ДЛЯ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 КВ

В статье рассмотрена проблема улучшения качества электроснабжения потребителей в распределительных сетях России. Одним из способов решения этой проблемы является использование реклоузеров. Для оценки эффективности инвестиций в модернизацию распределительных сетей были проведены расчеты, благодаря которым возможно определить сроки окупаемости оборудования. Применение реклоузеров обеспечивает защиту сети энергоснабжения, что позволяет повысить надежность и качество сети, снижая потери электроэнергии.
Ключевые слова: *Smart Grid, реклоузер, надежность, фидер, срок окупаемости.*

A. D. Goryunov*
Student
M. V. Serzhantova*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

USING RECLOSERS FOR AUTONOMOUS CONTROL IN 6–10 KV DISTRIBUTION NETWORKS

The article considers the improvement of the quality of electricity supply to consumers in the distribution networks of Russia. One way to solve this problem is to use reclosers. To assess the effectiveness of investments in the modernization of distribution networks, calculations were carried out due to which it is possible to determine the payback period of equipment. The use of reclosers provides increased protection of the power supply network, which improves the reliability and quality of the network, reducing power losses.
Keywords: *Smart Grid, recloser, reliability, feeder, payback period.*

Введение

В настоящее время крайне большая часть, а именно больше 80% электросетей в России были построены между 61 и 85 годами двадцатого века. Больше половины распределительных сетей уже выработала свой рабочий ресурс и требует замены на новое обновленное оборудование. Из-за этого в сетях происходят частые перепады электроэнергии.

Системой защиты в распределительных сетях обычно являются предохранители, а также реклоузеры. Реклоузер может предотвратить длительные отключения, устраняя временные неисправности до срабатывания предохранителей в системе. Таким образом, он снижает количество времени, требуемое на восстановление сети для дальнейшей ее работоспособности.

В настоящее время вопросы качества электроэнергии стали еще важнее из-за все более широкого использования оборудования, чувствительного к прерываниям напряжения. Согласно упомянутым соображениям, представляется необходимым использовать автономные реклоузеры для достижения баланса между качеством электроэнергии и эффективностью схемы экономии предохранителей.

Назначение реклоузеров

Сейчас все больше распространяются проекты, которые связаны с концепцией Smart Grid. Внедрение такого оборудования, как реклоузер, соответствует основным идеям этой концепции.

Реклоузер представляет собой электротехническое устройство, которое позволяет управ-

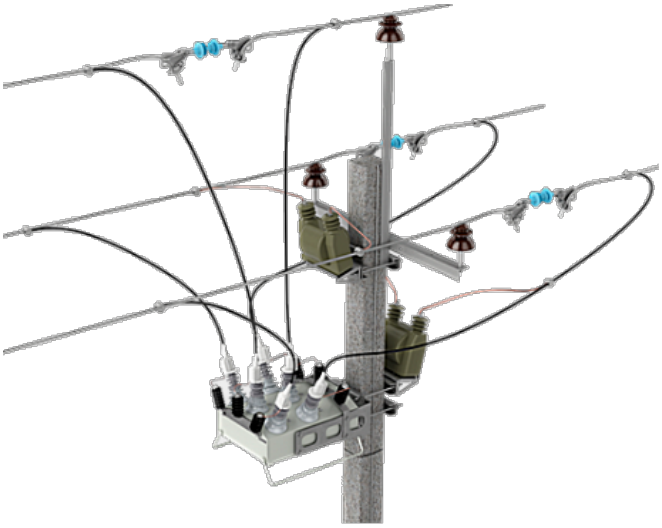


Рис. 1. Реклоузер на опоре

Рис. 2. Вакуумный выключатель

лять распределительными сетями (рис. 1). Он способен контролировать и передавать текущие состояние сети в режиме реального времени. В случае аварийной ситуации производит автоматически отключение участка линии. Реклоузер способен как отключить, так и восстановить подачу электроэнергии в линии. Такие устройства называются пунктами секционирования столбовыми (ПСС) [1].

Данные устройства разработаны для использования в сетях до 35 кВ и обеспечивают качественное обеспечение электроэнергией. Благодаря системе автоматизации, реклоузер значительно упрощает контроль над сетью, а также повышает надежность.

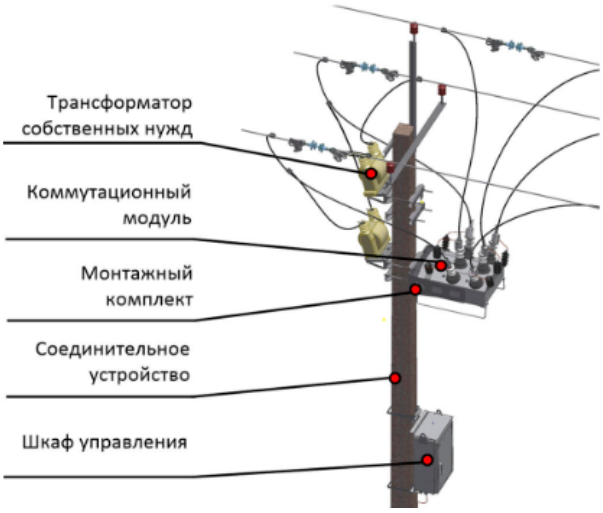


Рис. 3. REC15_AL

Конструктивные особенности

Главной частью реклоузера является вакуумный выключатель, который позволяет производить крайне быстрое переключение сети. Благодаря своим конструктивным особенностям, выполнять это он может автоматически. Изображение вакуумного выключателя представлено на рис. 2.

Для примера возьмем реклоузер REC15_AL, который был создан для автоматического регулирования секций воздушных или комбинированных линий 6(10) кВ. Изображение рабочего реклоузера REC15_AL представлено на рис. 3.

Функции реклоузера

К основной функции реклоузера, как и было сказано ранее, относится выполнение моментальных переключений контактов в распределительной сети. Реклоузер способен автоматически осуществлять отключение поврежденных участков сети, а также далее автоматически осуществлять повторное включение линии.

Благодаря микропроцессорным устройствам реклоузер способен выявлять поврежденные участки сети и осуществлять переключение и резервирование сети на неповрежденные существующие сети. Также данное устройство передает информацию о работе сети в режиме реального времени на пульт управления оператора.

Применение реклоузеров

Реклоузеры используются для секционирования воздушных распределительных сетей [2]:

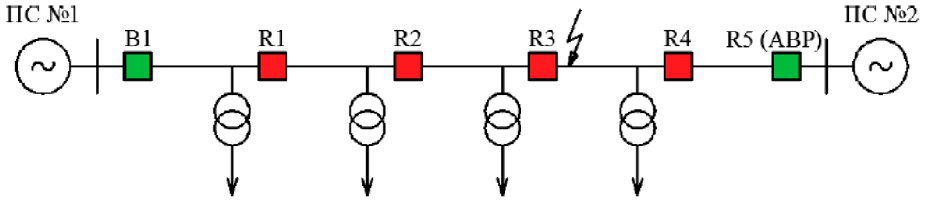


Рис. 4. Вариант установки реклоузеров в длинном фидере

– секционирование линий;
– разборка и сборка длинной линии;
– разграничение балансовой принадлежности между субабонентами;
– оптимизация диспетчерского управления сетью;
– резервирование потребителей от двух и более независимых источников.

В общем случае применение реклоузеров можно разделить на две группы:
– для обеспечения защиты радиальных фидеров;
– для обеспечения защиты кольцевых фидеров.

Применяются реклоузеры на длинных участках линии электропередач для защиты устройств. Это связано с тем, что для создания надежной децентрализованной системы управления аварийными ситуациями на длинных участках требуется установка большого количества реклоузеров. Такой подход позволяет обеспечить эффективное и быстрое реагирование на возможные аварии, минимизируя и предотвращая распространение повреждений по всей сети (рис. 4).

Реклоузер обладает высокой скоростью срабатывания, что позволяет без проблем интегрировать его в уже существующие электросети. Это становится возможным благодаря тому, что для установки реклоузера не требуется перенастраивать защитные устройства на главных выключателях линии [3].

Система управления

Для управления реклоузером модели REC15_AL используется вспомогательное ПО TELUS (Tavrida Electric User Software). Помимо использования персональных компьютеров, реклоузером возможно управлять с помощью пульта управления или непосредственно на месте установки. Схема внешних коммуникаций представлена на рис. 5.

Шкаф управления реколоузера обладает коммуникационные интерфейсы RS232 и RS485. Данные интерфейсы могут использо-

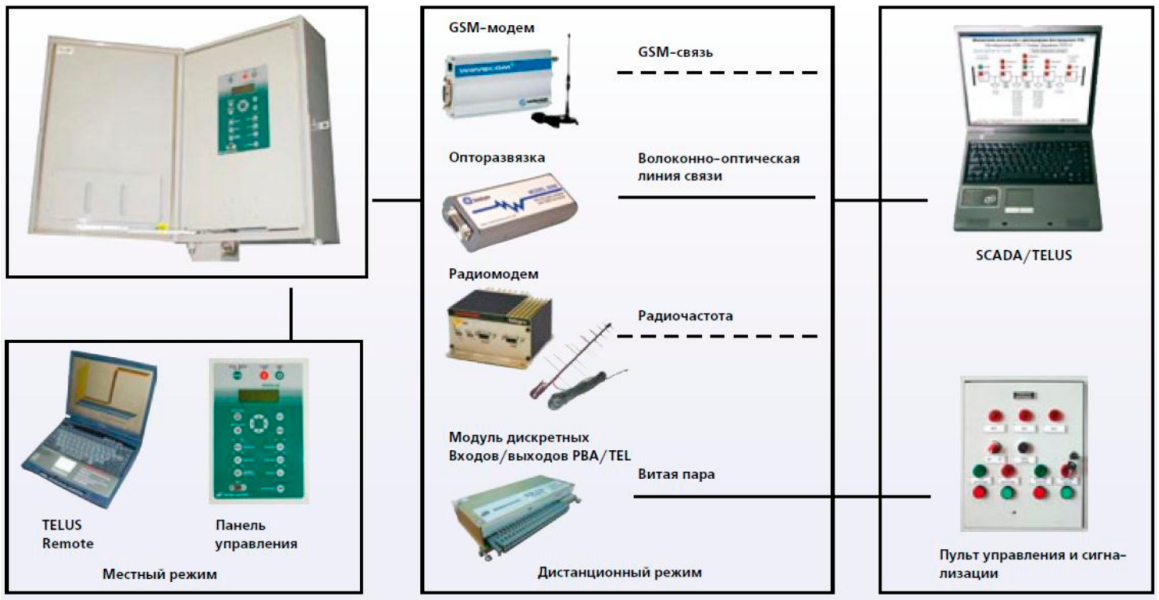


Рис. 5. Схема внешних коммуникаций REC15_AL [4]

ваться для подключения устройств связи, таких как радиоприемники, GSM-модемы, а также устройств авторазвязки. Устройство питается за счет системы бесперебойного устройства питания реклоузера.

SCADA-система дает отобразить электрические нагрузки, которые находятся в данный момент на реклоузере. Для выполнения базовых функций реклоузер не требует SCADA-систему, так как он способен автономно разделять линии [4].

Экономические особенности

В настоящее время в энергетической системе Российской Федерации эксплуатируется значительное количество подстанций с напряжением 35 кВ [5]. Большая часть оборудования, используемого на подстанциях, является довольно старой [6].

В настоящее время коммутационное оборудование имеет значительный возраст: 13% устройств эксплуатируются уже полвека, а 75% – более 25 лет. В связи с этим целесообразнее рассматривать не модернизацию существующих подстанций, а их полную замену новыми.

С 17 января 2017 г. реклоузеры официально признаны инновационным решением и включены в соответствующий реестр ПАО «Россети». Благодаря своим высокотехнологичным свойствам они обеспечивают высокий уровень автоматизации электрической сети, что позволяет оптимизировать ее работу и повысить эффективность. За счет этого приобретается более надежное и безопасное функционирование системы электроснабжения, а также снижаются риски возникновения аварийных ситуаций [7].

Для доказательства целесообразности реклоузеров в системах энергоснабжения приведен расчет срок окупаемости.

Ежегодные дополнительные доходы сетевой компании от снижения объемов недоотпуска электроэнергии будут следующими:

$$P_{д} = T \cdot (W_0 - W_1),$$

где $P_{д}$ – дополнительная прибыль, руб; T – тариф на электроэнергию, руб/кВт·ч; W_0 – объем недоотпуска без реклоузеров, кВт·ч; W_1 – объем недоотпуска с одним реклоузером, кВт·ч.

Согласно доступным данным, при установке одного реклоузера снижение энергии происходит приблизительно от 80 до 17 мВт·ч, следственно дополнительный доход равен:

$$P_{д} = T \cdot (W_0 - W_1) =$$
$$= 3{,}22 \cdot (80 - 17) = 202{,}86 \text{ тыс. руб.}$$

Производим расчет дохода от снижения ущерба в связи с тем, что учитывается компенсация потребителю при отключении энергоснабжения в размере выплаты трехкратной стоимости тарифа.

$$P_{с.у.} = 3 \cdot T \cdot (W_0 - W_1) =$$
$$3 \cdot 3{,}22 \cdot (80 - 17) = 608{,}58 \text{ тыс. руб.}$$

Общий доход от установки одного реклоузера за год:

$$P_{\Sigma} = P_{д} + P_{с.у.} =$$
$$= 202{,}86 + 608{,}58 = 811{,}44 \text{ тыс. руб}$$

С помощью метода нахождения неизвестных промежуточных значений некоторой функции по имеющемуся дискретному набору значений мы можем предсказать размер тарифов. Полученная линия тренда имеет коэффициент достоверности аппроксимации 0,988, что является хорошим результатом.

Начальные капиталовложения составляют 440 тыс. руб. Поскольку реклоузер представляет собой необслуживаемое устройство, затраты на его эксплуатацию отсутствуют. Срок службы реклоузера составляет 25 лет. Это устройство станет надежным помощником в обеспечении бесперебойной работы электросетей на протяжении четверти века, гарантируя безопасность и стабильность энергоснабжения [8].

Основываясь на экономических принципах, можно сказать, что период возврата инвестиций ($T_{ок}$) определяется через расчет чистой приведенной стоимости. Чистый доход приводится к начальному моменту времени $t = 0$ с учетом заданного коэффициента дисконтирования E. Так как увеличение тарифов компенсирует эффект инфляции, в этом расчете ее воздействием можно пренебречь. Следовательно, $T_{ок}$ рассчитывается путем решения следующего уравнения:

$$\sum_{t=1}^{Tок} ЧДД_t \cdot (1+E)^{-t} - K = 0,$$

где E – ставка дисконтирования, принятая 12%; K – капитальные затраты, руб.

После расчета и получаем затраты и поступления по данному проекту в виде графика, представленного на рис. 6.

График наглядно демонстрирует экономическую эффективность предложенного мероприятия и убедительно показывает, что инвестиции в реклоузер окупятся уже в первый год его использования.

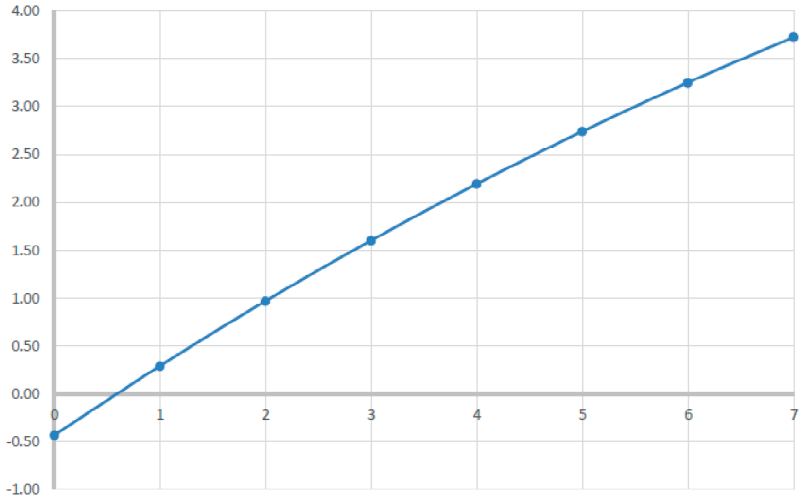


Рис. 6. Срок окупаемости реклоузера

Вывод

Внедрение реклоузеров в распределительные сети представляет собой перспективное и технологически обоснованное решение. Это полностью соответствует «Концепции технического перевооружения электрических сетей ПАО «Россети». Применение реклоузеров способствует повышению надежности электроснабжения, а также значительно снижает потери, связанные с недоотпуском электроэнергии.

Уже на текущий момент можно с уверенностью утверждать, что проектирование и строительство электрических сетей с использованием реклоузеров откроет новые горизонты для отечественных электрических сетей среднего напряжения. В ближайшем будущем это позволит значительно улучшить уровень автоматизации и управления, что, в свою очередь, приведет к более эффективному и стабильному функционированию всей энергетической инфраструктуры.

Библиографический список

1. Группа компаний «Энерготехмонтаж». URL: https://etmz.ru/reklouzeru-6-10-kv-chto-eto-takoe/ (дата обращения: 12.11.2024).

2. Механизмы контроля надежного и качественного электроснабжения потребителей электрической энергии. URL: https://rg.ru/2013/04/08/elektroseti-site-dok.html (дата обращения: 12.11.2024).

3. Современные технические решения для повышения надежности функционирования воздушных линий номинальным напряжением 6, 10 кВ / В. А. Попов, В. В. Ткаченко, Ю. Д. Манойло // ПРОМЕЛЕКТРО. 2010. № 6.

4. Инициатива. Вакуумные реклоузеры. URL: https://www.tavrida.ru/upload/iblock/9c0/xbex0ffkc4iy2nbk3zq1ombmr25chllo/TER_RecDoc_PG_5– (дата обращения:25.11.2024).

5. Система электроснабжения подстанции ФСК. URL: http://www.systemct.ru/article/3/ (дата обращения: 05.12.2024).

6. Реклоузеры 35 кВ. URL: http://smart35.ru/REK35/ (дата обращения: 05.12.2024).

7. Реестр инновационных решений ПАО «Россети». ПАО «Россети», 2017. URL: http://www.rosseti.ru/investment/introdution_solutions/doc/Reestr_IR170117.pdf/ (дата обращения: 05.12.2024).

8. Пункт автоматического секционирования, пункт автоматического ввода резервного питания, пункт отключения ответвления воздушных и воздушно-кабельных линий 10 (6) кВ на базе реклоузера РВА/TEL-10-12,5/630. ОТП-26.0013.

УДК 621.31 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-236-238**

Н. Л. Гречкин*
старший преподаватель
О. А. Чернов*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ TT – MOTOR

В работе рассмотрен пример исследования двигателя постоянного тока с постоянными магнитами. Разработан датчик скорости на базе Arduino UNO. Получена механическая характеристика. Разработана динамическая модель двигателя постоянного тока в среде Matlab/Simulink.
Ключевые слова: *двигатель постоянного тока с постоянными магнитами, механическая характеристика, динамическая модель.*

N. L. Grechkin*
Senior lecturer
O. A. Chernov*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

RESEARCH OF A DC MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS TT – MOTOR

The paper considers an example of a study of a DC motor with permanent magnets. A speed sensor based on the Arduino UNO has been developed. A mechanical characteristic has been obtained. A dynamic model of a DC motor has been developed in the Matlab/Simulink environment.
Keywords: *DC motor with permanent magnets, mechanical characteristics, dynamic model.*

В современном мире в различных технических устройствах и механизмах используют двигатели постоянного тока (ДПТ). Такие электрические машины применяются в аккумуляторных инструментах, станках, детских игрушках, транспорте, а с недавного времени в летательных, гусеничных, колесных и других роботах. Это связано с тем, что ДПТ имеет ряд преимуществ перед машинами переменного тока: практически линейные регулировочные и механические характеристики, компактные размеры, более высокое КПД, питание от аккумуляторов.

При этом создание качественной системы автоматического управления, включающей ДПТ, зависит не только от правильного выбора элементной базы, а также от принципов и законов управления. Современные методы проектирования систем управления осуществляются при помощи составления математических моделей.

Рассмотрим исследование и создание математической модели ДПТ. Объектом исследования выступает двигатель постоянного тока с постоянными магнитами с редуктором 1:48 TT – motor, представленный на рис. 1.

Для исследования двигателя необходима следующая элементная база:
– датчик тока
– датчик напряжения
– датчик сопротивления
– измеритель иммитанса
– датчик скорости

Для составления динамической модели необходимы следующие параметры двигателя:
– напряжение на якоре $U_{Я}$;
– сопротивления якоря $R_{Я}$;

Рис. 1. ДПТ с постоянными магнитами

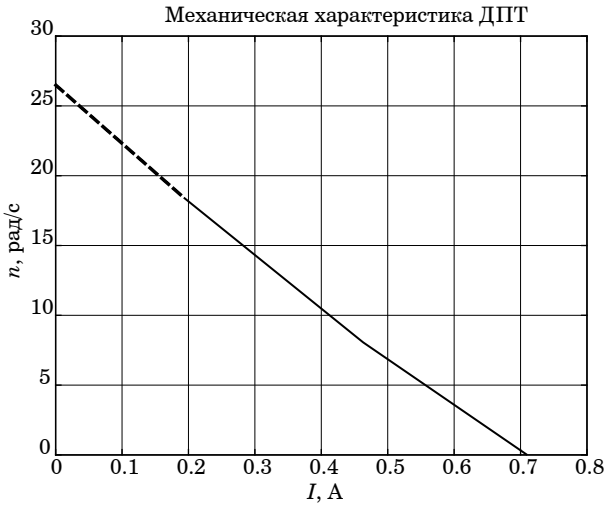


Рис. 2. Механическая характеристика ДПТ

– индуктивность якоря $L_Я$;

– момент инерции двигателя и редуктора J;

– произведение конструктивной постоянной и потока СЕФ;

– Статический момент M_C

Для определения величины $C_E\Phi$ была получена механическая характеристика двигателя $n=f(I_a)$.

Для получения характеристики был использован энкодер инкрементальный на плате EC11 на базе Arduino UNO и датчик тока [1]. Механическая характеристика представлена в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1

Механическая характеристика

n, рад/с	0	8,063	18,430	21,7
I, А	0,71	0,463	0,193	0,117

Для определения величины $C_E\Phi$ была использована формула нахождения ЭДС [3]:

$$E_я=C_E\Phi n \qquad (1)$$

Откуда следует:

$$C_E\Phi=\frac{E_Я}{n}. \qquad (2)$$

Уравнение напряжения ДПТ имеет вид:

$$U=E_Я- I_Я R_Я. \qquad (3)$$

В генераторном режиме ток якоря $I_я=0$, поэтому уравнение (3) примет вид:

$$U=E_Я \qquad (4)$$

Тогда формула (2) примет вид:

$$C_E\Phi=\frac{U}{n_0}.$$

Для определения величины $C_E\Phi$ при помощи датчика скорости и датчика напряжения были сняты несколько точек зависимости напряжения от скорости вращения ДПТ в генераторном режиме. Полученные значения $C_E\Phi$ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения $C_E\Phi$

U, В	1,47	2,28	3,09
n, рад/с	363,7460	567,0007	768,4555
$C_E\Phi$	0,0040	0,0040	0,0040

Таким образом, по результатам исследования были получены необходимые характеристики ДПТ для составления динамической модели в среде Matlab/Simulink, представленной на рис. 3 [2].

Переходный процесс модели в сравнении с переходным процессом реальной системы представлен на рис. 4.

Таким образом, было проведено исследование двигателя постоянного тока с постоянными магнитами, построена механическая характеристика, получена динамическая модель. Как

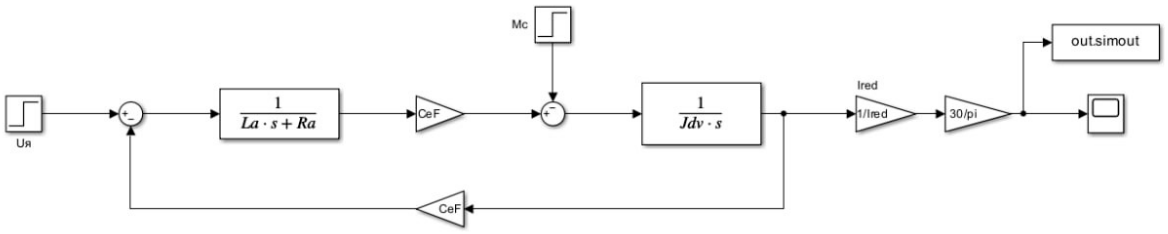


Рис. 3. Динамическая модель ДПТ

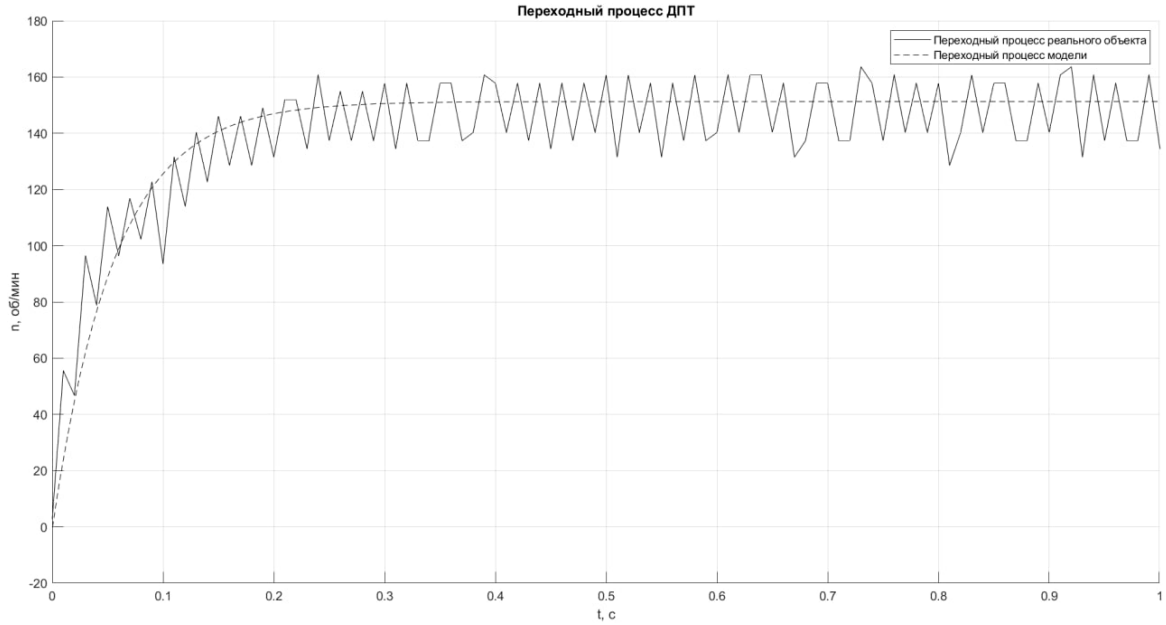


Рис. 4. Переходный процесс ДПТ

видно из результатов моделирования, метод моделирования достаточно точен в условиях маломощной электрической машины.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Библиографический список

1. Мир микроконтроллеров. URL: https://microkontroller.ru/arduino-projects/analogovyj-spidometr-na-osnove-arduino-i-infrakrasnogo datchika/?ysclid=m24jgisq8d8599864 (дата обращения: 10.10.2024).

2. *Карапетьян В. А., Крамарь В. А.* Исследование САУ средствами пакета Simulink: метод. ук. к вып. лаб. раб. по дисц. «Теория автоматического управления» для студ. напр. подг. 27.03.04 – «Управление в технических системах». Севастополь: СевГУ, 2020. 29 с.

3. *Вольдек А. И., Попов В. В.* Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2008. 320 с.

УДК 681.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-239-245**

А. Ю. Кучмин*
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник
** Институт проблем машиноведения Российской академии наук*

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Работа посвящена исследованиям в области интеллектуальных электромеханических систем, которые являются одним из бурно развивающихся направлений в области киберфизических систем. Приведен обзор актуальных задач, которые необходимо решать в области интеллектуальных электромеханических систем, а также указываются основные направления в данной области. Рассмотрены основные направления, такие как идентификация, управление и синтез в интеллектуальных электромеханических системах при наличии различного рода ограничений, внешних воздействий и неопределенностей. Показано, что эффективным подходом к решению поставленных задач является гибридный подход, основанный на объединении классических технологий с методами искусственного интеллекта. Предложено создание иерархических систем управления с использованием идей оптимального управления, которое сводится к последовательности задач математического программирования.
Ключевые слова: *интеллектуальные электромеханические системы, идентификация сложных систем, оптимальное управление, интеллектуальное управление.*

A. Yu. Kuchmin*
Dr. Sc., Tech., Leading Research Employee
**Institute for Problems in Mechanical Engineering of Russian Academy of Sciences*

SMART ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

The work is devoted to research in the field of smart electromechanical systems, which are one of the rapidly developing areas in the field of cyber-physical systems. An overview of current problems that need to be solved in the field of smart electromechanical systems is given, and the main directions in this area are indicated. The main directions are considered, such as identification, control and synthesis in smart electromechanical systems in the presence of various kinds of constraints, external influences and uncertainties. It is shown that an effective approach to solving the problems is a hybrid approach based on the combination of classical technologies with artificial intelligence methods. It is proposed to create hierarchical control systems using the ideas of optimal control, which is reduced to a sequence of mathematical programming problems.
Keywords: *smart electromechanical systems, identification of complex systems, optimal control, intelligent control.*

Введение

При управлении сложными физико-техническими системами все более широко используется кибернетический подход [1–4], и как следствие этого получило широкое распространение интеллектуальное управление. В рамках данного подхода было создано новое направление в теории управления динамическими системами физической природы, получившее название «теория киберфизических систем», которая в настоящий момент бурно развивается. Киберфизическая система включает в себя объект управления, диагностики или мониторинга, имеющий физико-техническую природу, измерительную систему, а также систему управления, функционирующие с использованием кибернетического подхода. Основоположником киберфизического подхода является Хелен Джил [3], а одним из основных российских ученых, использовавших кибернетический подход в подобного рода системах, был А. Л. Фрадков [4]. Киберфизический подход предусматривает стратифицированное описание, где большое внимание уделяется исследованию информационных потоков.

Одним из бурно развивающихся направлений в киберфизических системах являются интеллектуальные электромеханические системы (ИЭМС) [5, 6], которые получили широкое распространение в различных отраслях науки и техники. Стандартная ИЭМС включает в себя физико-технический объект управления, исполнительный механизм параллельной структуры и интеллектуальную систему управления. В качестве исполнительных механизмов широкое распространение получили параллельные кинематические машины [7–13], которые обладают следующими преимуществами:

– высокая адаптивность и быстродействие;
– низкая металлоемкость;
– высокая энергоэффективность;
– способность оперировать большими нагрузками;
– одновременное перемещение по нескольким степеням свободы;
– высокая точность перемещений;
– унифицированность блоков, что упрощает изготовление, и т. д.

Помимо этого, имеются и недостатки. Данные исполнительные механизмы являются нелинейными нестационарными системами и требуют создания сложных систем управления ими, что является важной и актуальной задачей. Чаще всего в качестве исполнительных механизмов применяются n-поды, которые состоят из двух адаптивных платформ, перемещаемых с помощью электромеханических домкратов, называемых актуаторами. Одним из примеров такого устройства является гексапод, использующий в своей структуре шесть актуаторов.

При решении задач управления ИЭМС используются различные технологии классической теории управления, оптимальной теории управления и интеллектуального управления. Для управления в ИЭМС могут быть применены различные парадигмы искусственного интеллекта, такие как искусственные нейронные сети, нечеткая логика, эволюционные методы (генетический алгоритм), эмерджентные системы, логико-вероятностные и логико-лингвистические подходы и их комбинации. Управление в ИЭМС – это сложная задача, которая может быть эффективно решена комбинированием различных технологий искусственного интеллекта, а исследования в этой области являются важными и актуальными.

В настоящее время технологии ИЭМС стали широко внедряться в создание экспериментальных стендов для исследования физико-технических характеристик объектов физического мира и технических систем. Важной является задача учета влияния экспериментальной установки на определение характеристик испытуемых объектов и систем. Технологии ИЭМС позволяют использовать перспективные подходы для решения этих актуальных и важных задач.

Виды интеллектуальных электромеханических систем

В настоящее время ИЭМС широко распространены в различных физико-технических системах, и их можно классифицировать по типу исполнительных механизмов и алгоритмов управления. Центральным отличием ИЭМС от других систем является интеллектуальная система управления, чаще всего параллельного типа, которая формируется по аналогии с нервной системой животных и человека [7–13]. Соответственно, ИЭМС можно подразделять по типу алгоритмов управления, то есть они бывают нейросетевые, агентные, логико-лингвистические и логико-вероятностные, а также гибридные.

Также существующие разнообразные виды ИЭМС можно классифицировать по типу движителей. Отличительной особенностью ИЭМС является наличие движителей параллельной кинематической схемы, хотя существуют ИЭМС с исполнительными механизмами классических компоновок. В настоящее время большой интерес представляют ИЭМС с исполнительными механизмами параллельной структуры, потому что они обладают рядом свойств, обеспечивающих большую эффективность их использования по сравнению с классическими компоновками. Наиболее распространенным типом движителя параллельной структуры являются n-поды. Типовая структура n-пода представляет собой две платформы: базовую и адаптивную, которые перемещаются одна относительно другой с помощью актуаторов (электромеханических, гидравлических, пневматических). Актуаторы крепятся к платформам с помощью шарниров, которые обеспечивают движение по требуемым степеням свободы. В n-поде используются n актуаторов. Широко известный пример n-пода – это гексапод. В нем используется шесть актуаторов, обеспечивающих перемещение адаптивной платформы относительно базовой по шести степеням свободы: трем угловым и трем линейным.

Помимо n-подов, получили распространение движители параллельной структуры, тоже состоящие из двух платформ (базовой и адаптивной), которые позволяют менять геометрию этих платформ. Платформы одна относительно другой также перемещаются с помощью актуаторов. Такие движители называются n-подами с платформами переменной геометрии. Классические n-поды и n-поды с платформами переменной геометрии являются базовыми блоками, из которых могут быть сконструированы более сложные системы: различные роботы, манипуляторы (искусственные хоботы), адаптивные поверхности и т. д. Следует отметить, что подобного рода системы получили широкое распространение в различных отраслях науки и техники. Они применяются при создании робо-

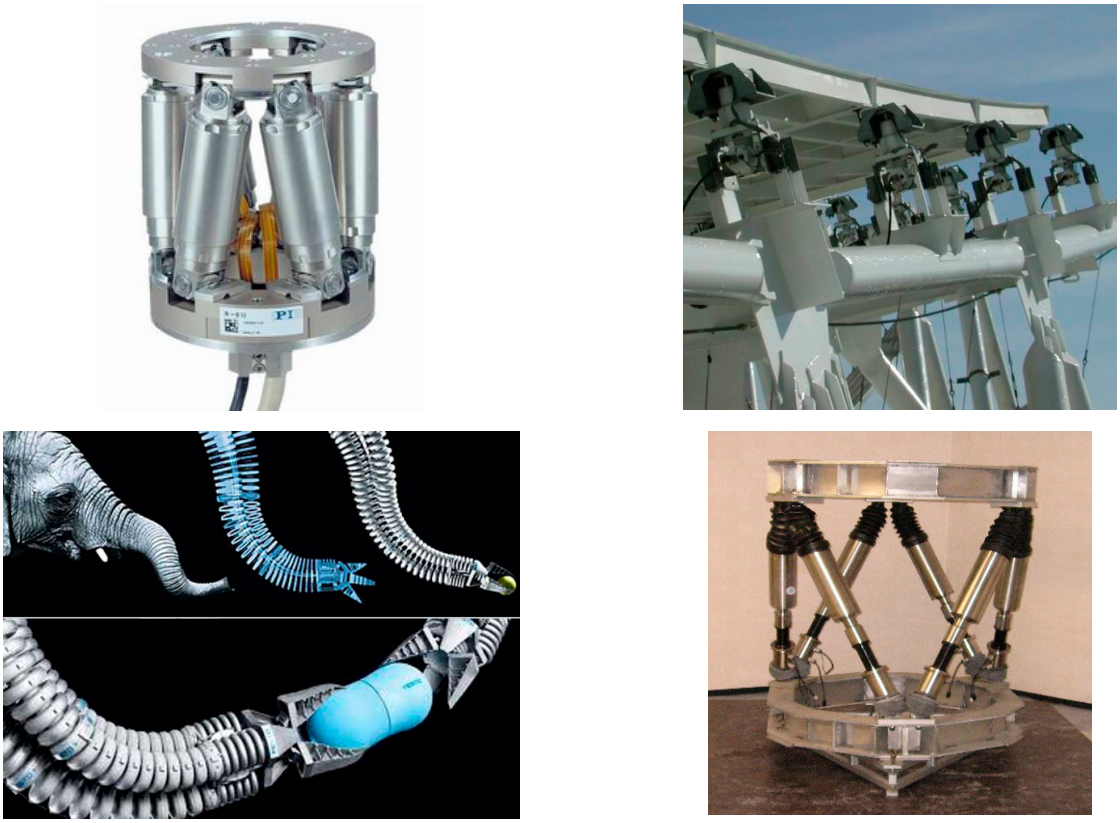


Рис. 1. Примеры ИЭМС

тотехнических систем, обрабатывающих станков, с их применением строятся адаптивные поверхности антенных систем и т. д.

Основные направления исследований в интеллектуальных электромеханических системах

Несмотря на все свои преимущества, ИЭМС являются сложными нелинейными нестационарными динамическими объектами, поэтому исследования в данной области являются актуальными, и можно выделить следующий ряд задач, которые необходимо решать [7–14]:

– математическое и компьютерное моделирование ИЭМС и их элементов;

– идентификация параметров, вектора состояния, внешних воздействий и структуры ИЭМС;

– разработка интеллектуальных систем управления в ИЭМС, которые позволяют функционировать при влиянии различного рода внешних воздействий и факторов в условиях различного рода ограничений;

– исследование динамических процессов в ИЭМС;

– создание методов и алгоритмов коллективного принятия решений группой ИЭМС с использованием интеллектуальных технологий;

– анализ данных и знаний в ИЭМС;

– разработка аппаратно-программного обеспечения в ИЭМС.

Проблемы идентификации в интеллектуальных электромеханических системах

Так как ИЭМС являются сложными нелинейными нестационарными динамическими объектами, которые функционируют при наличии различного рода неопределенностей, внешних воздействий и ограничений, особое внимание приходится уделять вопросам идентификации [15, 16] в подобных системах. Следует выделить четыре основных направления в идентификации в ИЭМС:

– идентификация структуры ИЭМС;

– идентификация параметров и характеристик;

– оценивание различного рода внешних воздействий;

– оценивание неизмеряемых компонент вектора состояния системы.

При этом существенное влияние на решение поставленных задач оказывают различного рода ограничения, в которых функционируют ИЭМС. Все задачи идентификации в нелинейных нестационарных системах связаны между собой, что усугубляет проблемы при их решении. Существуют три основных подхода в идентификации ИЭМС: статистический, множественно-функциональный и интеллектуальный. Одним из методов статистического подхода являются МНК-идентификаторы, используемые для определения структуры и параметров квазистационарных динамических систем. В качестве моделей в подобного рода идентификаторах используются системы разностных уравнений (чаще всего линейные). Нахождение этих параметров осуществляется с помощью процедуры, основанной на поиске минимума квадрата отклонений выходов модели от измеряемых компонент вектора состояния ИЭМС. Стандартные МНК-идентификаторы не учитывают влияние начальных условий, внешних воздействий и ограничений. В работе [15] предложены модифицированные МНК-идентификаторы для квазистационарных и нестационарных ИЭМС, позволяющие учитывать эти факторы. Тогда синтез модифицированного МНК-идентификатора формулируется как задача математического программирования. Следует отметить, что есть сильное влияние совместного оценивания параметров ИЭМС и действующих на него внешних воздействий. Поэтому наиболее высокую эффективность модифицированные МНК-идентификаторы имеют при медленно меняющемся внешнем воздействии. В качестве модели внешнего воздействия высокую эффективность показали кусочно-полиномиальные аппроксимации на небольших выборках. Например, в задачах идентификации параметров и внешних воздействий в ИЭМС для исполнительных механизмов адаптивных зеркальных систем радиотелескопов, где основными внешними факторами являются тепловое и ветровое воздействия, эффективно использовались кусочно-линейные аппроксимации.

Следует отметить, что модифицированные МНК-идентификаторы, как и классические, не позволяют учитывать нежесткости моделей и различного рода неопределенности, которые, например, могут задаваться в интервальном виде. Для решения подобных задач широкое распространение получили методы на основе множественно-функционального подхода. Их отличительной особенностью является использование нежестких моделей, чаще всего задающихся системами неравенств. В работе [15] показано, что решение задачи идентификации ИЭМС при множественно-функциональном подходе может быть сформулировано как решение задачи математического программирования. В данном случае необходимо выбрать некоторый критерий качества модели, который чаще всего задается в некотором интегральном виде, в дальнейшем сводящемся к стандартному виду, используемому в задачах математического программирования, и решается задача минимизации этого функционала при наличии различного рода ограничений в виде неравенств, описывающих модель ИЭМС, ограничения, которые действуют на ИЭМС, а также различного рода законы физического мира, которые определяют физическую адекватность создаваемой модели.

В настоящее время особое внимание при решении задач идентификации в ИЭМС уделяется использованию методов искусственного интеллекта, основанных на логико-вероятностном, логико-лингвистическом, нейросетевом, эволюционном и гибридном подходах. Гибридные технологии искусственного интеллекта представляют собой комбинацию различных подходов с целью максимизировать преимущества и минимизировать их недостатки. В задачах идентификации в ИЭМС большое распространение получили искусственные нейронные сети, позволяющие строить модели ИЭМС в процессе обучения [17,18]. Для этого используются сети как прямого распространения, так и рекуррентные. Можно отметить следующие преимущества нейронных сетей, такие как обучаемость, адаптивность, робастность и т. д. К недостаткам следует отнести сложные алгоритмы обучения, невозможность выделения атомарного знания в подобных структурах и сложность с введением различного рода ограничений, которые имеют физическую природу. Искусственные нейронные сети позволяют описывать системы, которые действуют в различного рода неопределенностях и внешних воздействиях, но это достигается за счет увеличения размерностей нейронных сетей, что приводит к ухудшению качества обучения и устойчивости. Для преодоления этих проблем можно использовать гибридный подход. В частности, были разработаны интервальные нейронные сети, которые оперируют интервальными данными, что позволяет строить нежесткие модели при меньшей размерности сети, чем при классическом подходе. Для повышения эффективности обу-

чения этих сетей могут применяться эволюционные технологии, например, генетический алгоритм. Помимо объединения нейронных сетей и операций над интервальными данными высокую эффективность показывают нейронечеткие сети, которые позволяют строить модели влияния внешних воздействий на ИЭМС.

Синтез систем управления в интеллектуальных электромеханических системах

Как уже отмечалось, ИЭМС представляют собой большие нелинейные нестационарные системы, действующие при различных ограничениях, внешних воздействиях, в условиях неопределенностей. Подобные системы имеют большое число степеней свободы, что приводит к неоднозначности при выборе траекторий движения этих систем при управлении. Основная тенденция при создании систем управления ИЭМС это разработка многоуровневых систем управления [19, 20]. Предлагается подход, который называется управление по «слабому звену», который заключается в выборе наиболее критических узлов, подверженных наибольшему влиянию ограничений и внешних воздействий. Раскрытие неоднозначности траекторий движений ИЭМС приводит к постановке задачи оптимального управления с выбором некоторых критериев, позволяющих оценивать качество переходных процессов и синтезируемых траекторий. Предлагается четырехуровневая иерархическая система управления, состоящая из четырех уровней принятия решений;

Слой № 1: Тактический регулятор модуля ИЭМС.

Слой № 2: Групповой регулятор модуля ИЭМС.

Слой № 3. Планировщик траектории движения модуля ИЭМС.

Слой № 4. Планировщик траектории всей системы.

Самый низкий, первый уровень иерархии соответствует тактическому уровню принятия решений. Здесь синтезируется управление для исполнительных механизмов и приводов модулей ИЭМС. На уровне № 2 решается задача группового управления исполнительными механизмами модуля ИЭМС с учетом влияния различного рода ограничений, внешних воздействий и неопределенностей. Так как широко распространенным базовым модулем ИЭМС является n-под, для него были разработаны быстрые алгоритмы синтеза программных движений при различного рода ограничениях на фазовые координаты базового модуля. На уровне № 3 решается задача синтеза программных движений и вырабатывается траектория для модуля ИЭМС с учетом влияния макроограничений физического мира, в котором он функционирует, и различного рода внешних воздействиях. На уровне № 4 решается задача создания оптимальной траектории движения всей системы на базе модуля ИЭМС с учетом выбранных критериев оптимальности при различного рода ограничениях и внешних воздействиях.

Применение методов интеллектуальных электромеханических систем при создании стендов для экспериментальных исследований

Технологии ИЭМС в настоящее время широко используются при создании экспериментальных стендов для исследования характеристик различных систем и материалов [21, 22]. Исследования тонких эффектов и особых режимов в современных системах и материалах приводит к необходимости учета влияния экспериментальной установки и ее измерительной системы на процессы, происходящие в испытуемых образцах. Для решения этой задачи используются как конструктивные элементы ИЭМС, так и методы управления и идентификации в них. На протяжении нескольких лет в ИПМаш РАН проводились исследования в этом направлении. Анализировалось влияние элементов экспериментальных установок для двух типов экспериментальных стендов: установки для определения характеристик ударного разрушения с газовой пушкой и стенда на основе разрезных стержней Кольского. В стенде с разрезными стержнями Кольского было установлено существенное влияние элементов испытательного стенда на протекающие в образцах процессы. Были разработаны алгоритмы анализа и фильтрации сигналов с измерительной системы стенда, позволившие почти в два с половиной раза сократить дисперсию для характеристик, получаемых на данном стенде.

Для установки с газовой пушкой применение методов идентификации ИЭМС позволило создать новую модель разрушения материалов при высокоскоростном разрушении с учетом влияния экспериментальной установки и ее измерительной системы, что позволило выделить нестационарные осцилляции на фронте ударной волны, регистрируемые на свободной поверхности образца. Данные осцилляции являются важным элементом, который подтверж-

дает наличие мезоскопического уровня при разрушении материалов.

Заключение

В настоящее время ИЭМС является бурно развивающимся направлением, а сами системы широко внедряются в различного рода физико-технические приложения. Несмотря на серьезное развитие методов синтеза, анализа, идентификации и управления для ИЭМС существует большой класс задач, который требует решения, поэтому развитие подходов, методов и алгоритмов в данном направлении является актуальным. Одним из эффективных направлений решения задач управления в ИЭМС является создание иерархических систем управления с использованием идей оптимального управления с учетом различного рода ограничений, которые предлагается сводить к последовательности задач математического программирования. А также развитие подходов искусственного интеллекта, в частности гибридных методов и систем, позволяет синтезировать системы управления с нежесткими моделями, способными обучаться в ходе функционирования системы, что позволяет рассчитывать управляющие воздействия при наличии различного рода неопределенностей и возмущений. Технологии ИЭМС, особенно в области их идентификации, широко используются в различных испытательных стендах, что позволяет открывать новые тонкие эффекты и повышать точность определения характеристик.

Благодарности

Работа поддержана Минобрнауки Российской Федерации (проект госзадания 124041500008-1).

Библиографический список

1. *Винер Н.* Кибернетика или управление и связь в животном и машине. 2-е изд. М.: Сов. радио, 1968. 326 с.

2. *Kravets A. G., Bolshakov A. A., Shcherbakov M.* (Eds.). Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling. Springer Nature Switzerland AG, 2020. 347 p.

3. *Куприяновский В. П., Намиот Д. Е., Синягов С. А.* Киберфизические системы как основа цифровой экономики // International Journal of Open Information Technologies. 2016. № 2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kiber-fizicheskie-sistemy-kak-osnova-tsifrovoy-ekonomiki (дата обращения: 16.10.2024).

4. *Фрадков А. Л.* Кибернетическая физика: принципы и примеры. СПб.: Наука, 2003. 207 с.

5. *Городецкий А. Е.* Интеллектуальные электромеханические системы [Smart Electromechanical Systems]. Шпрингер Интернашионал Паблишинг Швейцария, 2016. 277 с. (на англ. яз.).

6. *Городецкий А. Е., Курбанов В. Г.* Интеллектуальные электромеханические системы: центральная нервная система. [Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System]. Шпрингер Интернашионал Паблишинг АГ, 2017. 266 с. (на англ. яз.).

7. *Глазунов В. А.* Механизмы параллельной структуры и их применение: робототехнические, технологические, медицинские, обучающие системы / Отв. ред. акад. Р. Ф. Ганиев. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. 1036 с.

8. Групповое управление актуаторами контррефлектора радиотелескопа / Ю. Н. Артеменко [и др.] // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4. С. 2–9.

9. *Волкоморов С. В., Каганов Ю. Т., Карпенко А. П.* Моделирование и оптимизация некоторых параллельных механизмов. М.: Новые технологии, 2010. 32 с.

10. *Глазунов В. А., Колискор А. Ш., Крайнев А. Ф.* Пространственные механизмы параллельной структуры. М.: Наука, 1991. 96 с.

11. *Зенкевич С. Л., Ющенко А. С.* Основы управления манипуляционными роботами. М.: МГТУ, 2004. 480 с.

12. *Merlet J. P.* Parallel Robots (Solid Mechanics and Its Applications). Berlin: Springer. 2004.

13. *Хейло С. В., Глазунов В. А., Палочкин С. В.* Манипуляционные механизмы параллельной структуры. Динамический анализ и управление. М.: МГУДТ, 2014. 86 с.

14. *Kuchmin A. Yu.* Synthesis of Optimal Program Control for Synchronizing the Movements of a Group of SEMS Modules, Smart Electromechanical Systems Behavioral Decision Making / Editors: Gorodetskiy, Andrey E., Tarasova, Irina L. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2021. P. 81–94.

15. *Kuchmin A. Y.* Creation of Databases and Formalization of Knowledge Using Identification of SEMS, Working Under Various Constrains // Tarasova, I. L., Kulik, B. A. (eds) Smart Electromechanical Systems. Studies in Systems, Decision and Control, vol 544. Springer, 2024. Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-64277-7_5

16. *Kuchmin A. Y.* Identification of the SEMS Module Using the Example of a Model of a Linear Electric Drive of a Counter-Reflector Actuator Taking into Account Constrains // Tarasova, I. L., Kulik, B. A. (eds) Smart Electromechanical Systems. Studies in

Systems, Decision and Control, vol. 544. Springer, 2024. Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-64277-7_12

17. Аггарвал Чару. Нейронные сети и глубокое обучение: учеб. курс / Пер. с англ. СПб.: Диалектика, 2020. 752 с.: ил.

18. *Галушкин А. И.* Нейронные сети: основы теории. М.: Горячая линия-Телеком, 2012. 496 с.

19. *Kuchmin A. Yu.* Group Interaction of SEMS Modules at Control of an Adaptive Surface of the Main Dish, Smart Electromechanical Systems. Group Interaction / Editors: Gorodetskiy, Andrey E., Tarasova, Irina L. (Eds.) Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99759-9_15, 2018.

20. *Kuchmin A. Yu.* Synthesis of Optimal Program Control for Synchronizing the Movements of a Group of SEMS Modules, Smart Electromechanical Systems Behavioral Decision Making / Editors: Gorodetskiy, Andrey E., Tarasova, Irina L. (Eds.), Springer Nature Switzerland AG, 2021. P. 81–94.

21. Multi-scale model of steady-wave shock in medium with relaxation / D.A. Indeitsev [et al.] // Acta Mechanica. 2015. Т. 226. № 3. P. 917–930.

22. *Кучмин А. Ю., Абрамян А. К.* Применение математического программирования для анализа экспериментальных данных // Информационно-управляющие системы. 2014. № 6 (73). С. 20–28.

УДК 621.316.965 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-246-250**

А. А. Мартынов*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ТИРИСТОРНОГО УСТРОЙСТВА ПЛАВНОГО ПУСКА С ТОКООГРАНИЧЕНИЕМ

Рассмотрены вопросы защиты силовой схемы устройства плавного пуска от тока двухфазного короткого замыкания. Дается оценка возможности защиты тиристоров силовой схемы устройства плавного пуска от ударного тока короткого замыкания с помощью быстродействующих плавких предохранителей.
Ключевые слова: *плавкий предохранитель, трансформатор, тиристоры, токи короткого замыкания.*

A. A. Martynov*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

CURRENT PROTECTION OF A THYRISTOR SOFT STARTER WITH CURRENT LIMITATION

The issues of protection of the power circuit of a soft starter from a two-phase short-circuit current are considered. An assessment of the possibility of protecting the thyristors of the PPP power circuit from short-circuit shock current using high-speed fuses is given.
Keywords: *fuse, transformer, thyristors, short-circuit currents.*

Тиристорные устройства плавного пуска (УПП) предназначены, в частности, для создания магнитного потока в трансформаторе преобразователя частоты, необходимого для наведения в обмотках трансформатора противоЭДС, для исключения бросков тока фазных обмоток при подключении трансформатора к питающей сети, а также для обеспечения плавного повышения напряжения при заряде конденсаторов фильтра цепи постоянного тока преобразователя частоты [1].

На рис. 1 в качестве примера приведена структурная схема звена постоянного тока преобразователя частоты электропривода гребного винта с преобразовательным трансформатором, выполненным с двумя вторичными обмотками. Каждая трехфазная обмотка подключена на вход трехфазного выпрямителя. К выходным цепям выпрямителей подключены конденсаторы емкостного фильтра, заряд которых производится в процессе плавного пуска трансформатора.

На рис. 2 приведена электрическая схема тиристорного УПП, питание которого осуществляется от вторичной обмотки вспомогательного трансформатора (Т). Первичная обмотка это-

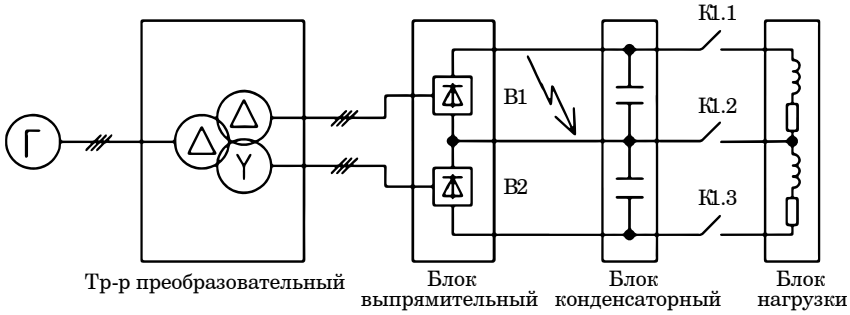


Рис. 1. Структурная схема звена постоянного тока преобразователя частоты электропривода гребного винта

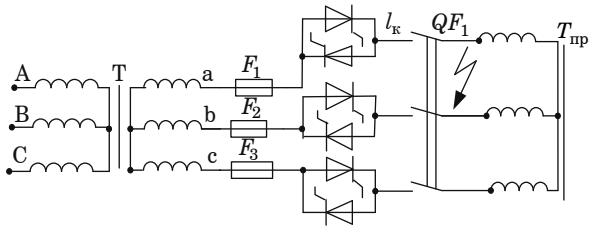


Рис. 2. Схема тиристорного УПП

го трансформатора подключается к силовым шинам электрического генератора (Г) питающей сети (рис. 1). На интервале пуска выходная цепь УПП подключается к одной из вторичных обмоток преобразовательного трансформатора ($Т_{пр}$). Напряжение, подаваемое от УПП на эту обмотку, изменяется плавно от нуля до номинального значения путем изменения величины угла регулирования α от 180° до 0° [2].

К УПП предъявляются жесткие требования по надежности и безотказности в работе, включая и требование по устойчивости к сверхтокам и токам короткого замыкания. Рассмотрим наиболее опасный аварийный режим – двухфазное короткое замыкание выходной цепи УПП (обозначено на рис. 2). Защита УПП от токов короткого замыкания может быть реализована с помощью:

быстродействующих плавких предохранителей (*F*1-*F*3), включенных в цепь вторичной обмотки вспомогательного трансформатора;

автоматического выключателя (*QF*1), установленного в выходной цепи УПП;

электронной защитой, реализуемой системой управления УПП путем прекращения подачи импульсов управления на тиристоры УПП. Схема управления УПП на рис. 2 не приведена.

В качестве примера рассмотрим УПП, на входе которого установлен трансформатор марки ТЛС-63/10,5/0,4 ОМ4 [2]. Параметры трансформатора:

мощность S_m = 63 кВ·А;

линейное напряжение первичной обмотки: $U_{1лN}$ = 10500 В;

линейное напряжение вторичной обметки: $U_{2лN}$ = 400 В;

напряжение короткого замыкания трансформатора: $U_{кз}$ = 2,6 %;

мощность потерь короткого замыкания трансформатора: $P_к$ = 910 Вт;

мощность потерь холостого хода 300 Вт;

коэффициент трансформации: $k_{тр}=U_{1лN}/U_{2лN}=10500/400=26{,}25$.

Номинальное значение тока фазы первичной обмотки:

$$I_{1фN}=\frac{S_T}{\sqrt{3}U_{1ЛN}}=\frac{63000}{\sqrt{3}\cdot 10500}=3{,}468\text{ А}.$$

Номинальное значение тока фазы вторичной обмотки:

$$I_{2фN}=I_{1фN}\cdot k_{тр}=3{,}468\cdot 26{,}25=91{,}035\text{ А}.$$

Полное сопротивление короткого замыкания, приведенное к виткам вторичной обмотки:

$$Z_{2к}=\frac{U_{2к}}{I_{2фN}}=\frac{400\cdot 0{,}026}{\sqrt{3}\cdot 91}=0{,}066\text{ Ом}.$$

Активное сопротивление короткого замыкания, приведенное к виткам вторичной обмотки:

$$r_{2к}=\frac{P_к}{3\cdot I_{2фN}^2}=\frac{910}{3\cdot 91^2}=0{,}036\text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмоток трансформатора, приведенное к виткам вторичной обмотки:

$$x_{2к}=\sqrt{{Z_{2к}}^2-{r_{2к}}^2}=0{,}0553\text{ Ом}.$$

Индуктивность рассеяния трансформатора:

$$L_{2к}=\frac{x_{2к}}{\omega_с}=1{,}76\cdot 10^{-4}\text{ Гн}.$$

где $\omega_с=2\pi f_с$.

Для двух последовательно соединенных фаз вторичной обмотки трансформатора:

$$R_{к.тр}=2r_{2к}=0{,}072\text{ Ом},$$

$$X_{к.тр}=2x_{2к}=0{,}1106\text{ Ом},$$

$$L_{к.тр}=2L_{2к}=3{,}522\cdot 10^{-4}\text{ Гн}.$$

Линия связи УПП с трансформатором $T_{пр}$:

длина кабеля $l_к$ = 10 м;

сечение провода одной фазы кабеля S =25 мм^2;

активное сопротивление провода кабеля одной фазы:

активное сопротивление двух фаз кабеля: $R_к=2\cdot R_{к1ф}$ =0,014 Ом;

индуктивность двух фаз кабеля:

$$L_{к.}=2\cdot L_{к1ф}=2\cdot 2\cdot 10^{-5}=4\cdot 10^{-5}\text{ Гн}.$$

Для расчета параметров короткого замыкания (КЗ), включая и амплитуду ударного тока, воспользуемся эквивалентной схемой замещения УПП в режиме КЗ (рис. 3).

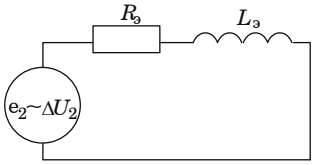


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения УПП в режиме КЗ

Принятые на рис. 3 обозначения: $R_э$ – эквивалентное активное сопротивление короткозамкнутой цепи; $L_э$ – эквивалентная индуктивность короткозамкнутой цепи; e_2 – ЭДС фазы генератора, приведенная к вторичной обмотке; ΔU_2 – падение напряжения на внутреннем сопротивлении генератора. В расчетах принято допущение $\Delta U_2=0$.

Эквивалентные сопротивления короткозамкнутого контура (рис. 2 и 3):

$$R_э = R_{к.тр} + R_к + R_{в.дин}, \quad (1)$$

$$L_э = L_{к.тр} + L_к, \quad (2)$$

где $R_{к.тр}$ – активное сопротивление короткого замыкания трансформатора, приведенное к вторичной обмотке трансформатора; $R_к$ – активное сопротивление кабеля; $R_{в.дин}$ – динамическое сопротивление открытого тиристора; $L_{к.тр}$ – индуктивность цепи короткого замыкания, приведенная к вторичной обмотке трансформатора; $L_к$ – индуктивность кабеля.

Отношение:

$$L_э/R_э=\tau_э,$$

где $\tau_э$ – постоянная времени короткозамкнутой цепи.

$$R_э=R_{к.тр}+R_к+R_{в.дин}=$$

$$=0{,}072+0{,}014+2\cdot0{,}0024=0{,}0908 \text{ Ом},$$

$$L_э=L_{к.тр}+L_к=3{,}522\cdot10^{-4}+4\cdot10^{-5}=3{,}9\cdot10^{-4} \text{ Гн},$$

$$X_э=\omega_с L_э=314\cdot3.9\cdot10^{-4}=0{,}123 \text{ Ом},$$

$$Z_э=\sqrt{R_э^2+X_э^2}=0{,}1528 \text{ Ом},$$

$$\tau_э=L_э/R_э=3{,}9\cdot10^{-4}/0{,}0884=4{,}4\cdot10^{-3}\text{с}.$$

$$I_{2m\,к}=\sqrt{2}\cdot U_{2Л}/Z_э=3689 \text{ А}.$$

Рассмотрим случай пуска трансформатора преобразовательного при поддержании постоянства тока фазы трансформатора $T_{пр}$, $I_{ф2}$=25 А.

С учетом рассчитанных выше параметров силовая схема УПП должна быть выполнена на тиристорах, среднее значение тока которых должно быть не менее 100 А, а напряжение – не менее 1000 В.

Таким требованиям удовлетворяют тиристорный модуль МТТ-100-12 со следующими параметрами:

максимально допустимый средний ток в открытом состоянии – 100 А;

максимальное допустимое действующее значение тока – 157 А;

максимальное допустимое обратное напряжение – 1200 В;

ударный ток в открытом состоянии (при $T_j=T_{j\max}$) – 2,5 кА;

защитный показатель – 31250 $А^2с$;

динамическое сопротивление в открытом состоянии – 2,4 мОм;

прямое падение напряжения – 1,8 В.

Ударный ток короткого замыкания короткозамкнутой цепи, содержащей трансформатор, $I_у$, включает в себя свободную и вынужденную составляющие [3] и может быть рассчитан по формуле (3):

$$I_у = I_{2m\,к}\,[\sin(\omega t-\varphi_к) + \sin\varphi_к\cdot e^{-\omega t\operatorname{ctg}\varphi_k}], \quad (3)$$

где $I_{2mк}$ – амплитудное значение тока короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора в установившимся режиме; $\varphi_к=\operatorname{arcctg}R_э/X_э$ – фазовый угол цепи короткого замыкания; $\omega=2\pi f$ – угловая частота питающей сети.

$$I_{2m\,к}=\sqrt{2}\cdot U_{2л}/Z_э,$$

где $Z_э$ – модуль полного эквивалентного сопротивления.

Формулу (3) можно записать в относительных единицах, приняв за базовое значение амплитудное значение тока короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора в установившимся режиме, т. е. $I_у^*=I_у/I_{2m\,к}$:

$$I_у^* = \sin(\omega t-\varphi_k)+\sin\varphi_k\cdot e^{\omega t\cdot\operatorname{ctg}\varphi_k}. \quad (4)$$

По формуле (4) можно рассчитать кривую ударного тока короткого замыкания УПП с учетом параметров трансформатора и линии связи. Решая уравнение (4), можно определить длительность импульса ударного тока $\lambda_{у.т}$, исходя из условия – при $t=\lambda_{у.т}$ ток $I_у^*=0$.

Для любого момента времени в пределах $0<t_{иi}<\lambda_{у.т}$ можно рассчитать действующее значение ударного тока $I_{у.д.з.}$, соответствующее заданной длительности импульса $t_{иi}$:

$$I_{у.д.з}=\sqrt{\frac{1}{\lambda_u}\int_0^{t_u} i_y^2 dt}. \quad (5)$$

Умножив квадрат действующего значения тока $I^2_{у.д.з.}$ на длительности импульса $t_{иi}$, можно

определить интеграл Джоуля импульса тока короткого замыкания, соответствующий выбранному моменту времени $t_{иi}$, $I^2_{у.д.}.t_{иi}$.

Амплитудное значение ударного тока короткого замыкания будет иметь максимальное значение в момент времени $t=\pi/\omega$ и может быть рассчитано по формуле (6):

$$I^*_{у} = 1 + e^{\pi R_э / x_э} = 1 + e^{\pi \cdot 0{,}0884/0{,}123} = 1{,}04. \quad (6)$$

Рассчитанное по формуле (6) относительное максимальное значение амплитуды ударного тока численно представляет собой значение ударного коэффициента $k_{уд}$.

Невысокое значение ударного коэффициента для рассматриваемого примера объясняется тем, что отношение эквивалентных сопротивлений $X_э$ и $R_э$ близко к 1. Благодаря этому понижается нагрузка на тиристор по ударному току. Однако даже при этом невысоком значении ударного коэффициента амплитуда ударного тока $I_{у\,m}$=1,04·3689=3836 А выше предельно допустимого значения ударного тока тиристора, равного 2500 А. Для защиты тиристоров от ударных токов короткого замыкания необходима быстродействующая защита, обеспечивающая токоограничение, т. е. отключение тиристора до достижения максимального значения амплитуды ударного тока [4].

Токоограничение можно выполнить так, как это показано на рис. 2, включив быстродействующие предохранители, $F1$, $F2$, $F3$, в цепь вторичной обмотки вспомогательного трансформатора.

Выберем предохранители FR22GR69V40T со следующими параметрами [5]:

номинальный ток – 40 А;

номинальный ток отключения – 150 кА;

номинальное напряжение – 690 В;

полное значение интеграла Джоуля $I^2{\cdot}t_{ср}$ при номинальном напряжении составляет 1059 $А^2с$;

значение интеграла Джоуля плавления плавкого элемента $I^2{\cdot}\Delta t_п$ при 1 мс составляет 210 $А^2с$.*

**Указанный в данных для выбора и в характеристиках интеграл плавления плавкого элемента соответствует виртуальному времени плавления $\Delta t_{п.в}$ = 1 мс.*

Для подключения-отключения УПП к обмотке трансформатора преобразовательного и для защиты этой цепи от сверхтоков можно использовать автоматический выключатель ВА11-024051L-30510-20 УХЛ3 на номинальный ток 40 А. Время отключения 0,02 с.

Кривая ударного тока может быть рассчитана по формуле (3). Первая полуволна ударного тока короткого замыкания трансформатора имеет форму, близкую к синусоидальной, причем максимум ударного тока имеет временной сдвиг по отношению к моменту времени возникновения короткого замыкания примерно равный полупериоду напряжения генератора, т. е. 0,01 с при частоте напряжения генератора, равной 50 Гц [3].

Кривая ударного тока, протекающего через предохранитель, содержит два участка:

преддуговой участок длительностью $t_р$;

участок горения дуги длительностью $t_д$.

Преддуговой участок предохранителя – это время между началом короткого замыкания и моментом возникновения электрической дуги. Преддуговой участок длительностью $t_р$ включает в себя интервал времени, отсчитываемый от начала короткого замыкания до момента времени, при котором сверхток достигает величины, достаточной для начала расплавления плавкого э*лемента предохранителя* (перемычки), $t_п$, а также время *плавления самого плавкого элемента предохранителя*, $\Delta t_п$, т. е. $t_р = t_п + \Delta t_п$. За время $t_п$, принимается время, при котором наступает равенство интеграла Джоуля импульса тока интегралу плавления плавкого э*лемента предохранителя*. Как следует из результата расчета, приведенного в табл. 1, для рассматриваемого примера время $t_п$ =0,00177 с. Время *плавления самого плавкого элемента предохранителя*, $\Delta t_п$ = 1мс, приведено в паспортных данных предохранителя. Плавление плавкого элемента произойдет на интервале времени 0,00177с<$\Delta t_п$<0,00277с. Виртуальное действующее значение тока $I_{д.з.в}$, при котором плавкий элемент предохранителя расплавится за 1 мс, должно составлять не менее:

$$I_{д.з.в} = \sqrt{210/0{,}001} = 458\,А.$$

Причем подразумевается, что это значение тока остается неизменным на всем интервале времени плавления плавкого элемента предохранителя, т. е. на интервале $\Delta t_{п.в}$=1 мс.

При коротком замыкании выходной цепи УПП амплитуда тока не остается постоянной, а изменяется во времени – увеличивается. Для интервала времени плавления плавкого элемента $t_п<t<t_р$ можно записать следующую зависимость ударного тока от времени:

$$i_у = I_{ут\,п} + (I_{ут\,р} - I_{ут\,п}) \cdot t/(\Delta t_п). \quad (7)$$

Воспользовавшись формулой (7), с учетом значений токов $I_{ут\,п}$ =604 А и $I_{ут\,р}$ =1313 А, можно рассчитать реальное действующее зна-

Таблица 1

Значения амплитуды ($I_{у\,m}$) и действующего значения ($I_{и.д.з}$) ударного тока и интеграла Джоуля ($I^2_{и.д.з}.t$) для заданных моментов времени

t, с	0	0,00833	0,00166	0,00177	0,00277	0,005	0,01
$I_{у\,m}$, А	0	56	536	604	1313	3320	3369
$I_{и.д.з}$, А	0	32,4	310	349	759	1919	1948
$I^2_{и.д.з} \cdot t$ А^{2}с	0	0,871	164	216	1595	18414	37943

чение импульса тока $I_{д.з.р}$ на интервале времени $t_п < t < t_р$. Это значение составляет 674 А.

Поскольку $I_{д.з.р} > I_{д.з.в}$, плавкий элемент предохранителя расплавится за интервал времени $\Delta t_{п.р}$ менее 1 мс. Время окончания преддугового участка для рассматриваемого примера составляет не более $t_р = t_п + \Delta t_п = 0{,}00177 + 0{,}001 = 0{,}00277$ с.

Численные значения амплитуды ударного тока для заданных моментов времени приведены в табл. 1.

После расплавления плавкого элемента начинается участок горения дуги. *Участок горения дуги* – это интервал времени между моментом появления дуги и моментом ее окончательного погасания, $t_д$. При появлении дуги прекращается рост тока короткозамкнутой цепи. Таким образом, предохранитель марки FR22GR69V40T при заданных параметрах короткозамкнутой цепи обеспечивает токоограничение на уровне $I_{у\,m}$=1313 А.

Коэффициент запаса тиристора по ударному току в этом случае равен 2500/1313=1,9.

Функция ограничения тока короткого замыкания с помощью быстродействующего плавкого предохранителя марки FR22GR69V40T в рассмотренном выше примере успешно реализуется.

Результаты выполненных исследований позволяют разработать эффективную защиту УПП от токов короткого замыкания и повысить его надежность.

Библиографический список

1. Моделирование электромагнитных процессов пуска трансформатора в составе преобразователя частоты электропривода гребного винта / А. А. Мартынов [и др.] // Труды КГНЦ. 2023. Т. 3, № 405. С. 99–116.

2. *Терехов В. М., Осипов О. И.* Системы управления электроприводов. Учебник для студ. высш. учебн. заведений. ИЦ «Академия», 2005.

3. *Ковалев Ф. И.* Полупроводниковые выпрямители / под ред. Ф. И. Ковалев, П. П. Мостковой. 2-е изд., перераб. М.: Энергия, 1978.

4. *Намитоков К. К., Хмельницкий Р. С., Аникеева К. Н.* Плавкие предохранители. М.: Энергия, 1979.

5. www.chauvinhcuong.com (дата обращения: 22.11.2024).

УДК 629.584:621.3.031+621.314 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-251-256**

А. А. Мартынов*
кандидат технических наук, доцент
О. Б. Чернышева*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ ПОПЛАВКОВЫХ ВОЛНОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО И ЛИНЕЙНОГО ТИПА

Выполнена сравнительная оценка поплавковых волновых электростанций с электрическими генераторами вращательного и линейного типа. Результаты разработки и исследования расширяют возможности выбора оптимального варианта системы энергообеспечения резидентных подводных роботов и робототехнических комплексов и способствуют ускорению процесса внедрения их на практике.
Ключевые слова: *поплавок, редуктор, электрический генератор.*

A. A. Martynov*
PhD, Tech., Associate Professor
O. B. Chernysheva*
Senior Lecturer
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ON THE DEVELOPMENT OF FLOAT WAVE POWER PLANTS WITH ELECTRIC GENERATORS OF ROTARY AND LINEAR TYPE

A comparative assessment of float wave power plants with electric generators of rotary and linear type is carried out. The results of the development and research expand the possibilities of choosing the optimal option for the power supply system for resident underwater robots and robotic systems and contribute to the acceleration of the process of their implementation in practice.
Keywords: *float, gearbox, electric generator.*

Введение

Морские волны образуются ветром, дующим над водной поверхностью, и возникают только в воде у поверхности моря. Волны пересекают океан практически без потерь энергии. Наилучшие волновые ресурсы имеют место в акваториях, где сильные ветры дуют в течение длительного времени. При направлении ветра с запада на восток лучшие волновые ресурсы располагаются вдоль восточного морского побережья. Волны с наибольшей амплитудой, несущие наибольшую энергию, формируются в открытом океане в местах наибольшей глубины. Ближе к береговой линии амплитуда волн уменьшается из-за трения о морское дно.

Приоритет энергетического потенциала океанских волн подтверждается тем фактом, что плотность мощности волн, т. е. доступный ресурс мощности волн на единицу площади, составляет примерно 40 кВт/м^2, что в 10 раз выше плотности мощности ветрового потока и примерно в 100 раз выше плотности солнечного потока. Необходимо отметить одну особенность морских волн – после создания волны распространяются уже без помощи ветра.

Разработке поплавковых волновых электростанций в настоящее время уделяется большое внимание во многих странах мира [1–3]. Результаты этих разработок опубликованы например, в [4–6]. Разработано большое количество типов и конструктивных схем поплавковых волногенераторов как с электрическими генераторами вращательного типа, так и с электрическими генераторами линейного типа, например, [7–11].

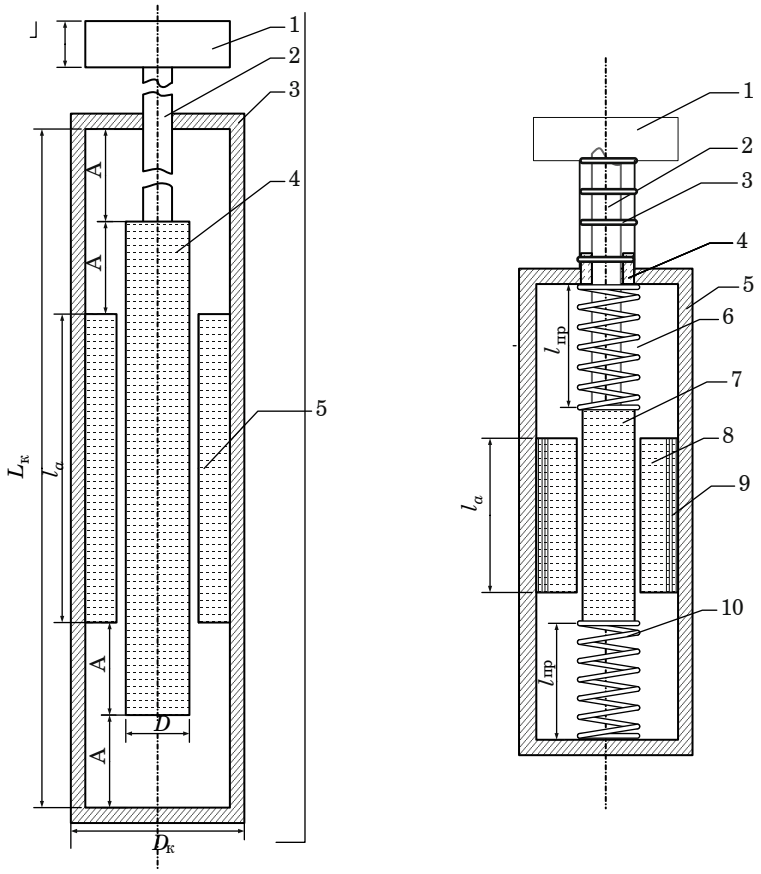


Рис. 1. Поплавковая волновая электростанция с электрическим генератором линейного типа, выполненный по традиционной конструктивной схеме

Поплавковая волновая электростанция с электрическим генератором линейного типа, выполненным по традиционной конструктивной схеме

На рис. 1 в качестве примера приведена конструктивная схема волногенератора с электрическим генератором линейного типа, выполненным по традиционной конструктивной схеме [7]. Обозначения, принятые на рис. 1: 1 – поплавок; 2 – шток; 3 – водонепроницаемая гофрированная муфта; 4 – направляющая втулка; 5 – корпус генератора; 6 – верхняя пружина; 7 – индуктор с магнитами кольцевой формы и кольцевыми ферромагнитными вставками; 8 – статор с катушками обмотки и ферромагнитными вставками магнитопровода статора тороидальной формы; 9 – наружный витой магнитопровод статора; 10 – нижняя пружина.

Под воздействием выталкивающей силы, действующей на поплавок 1, индуктор генератора 7 перемещается снизу-вверх (от впадины до гребня волны), силовые линии магнитов индуктора пересекают проводники катушек обмотки статора 8 и наводят в них ЭДС. При движении поплавка снизу-вверх, индуктор, обладающей массой $m_и$, запасает потенциальную энергию. При движении поплавка сверху-вниз потенциальная энергия, запасенная индуктором, преобразуется в электрическую энергию, вырабатываемую генератором. Для предотвращения попадания воды внутрь генератора меж-

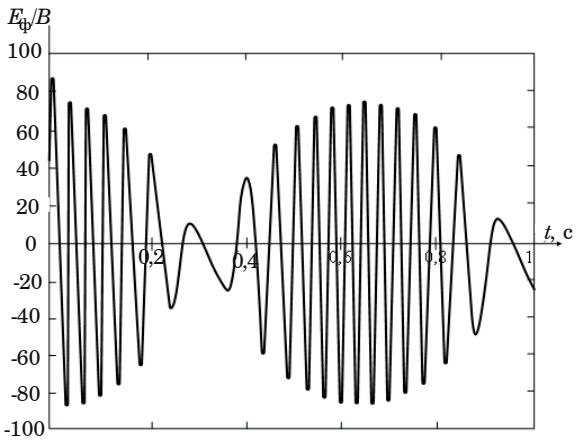


Рис. 2. ЭДС, наводимая в обмотке статора генератора

ду поплавком и корпусом генератора установлена водонепроницаемая гофрированная муфта 3. ЭДС, наводимая в обмотке статора за один период волны промодулирована огибающей, частота которой двукратна по отношению к частоте морской волны (рис. 2).

Поплавковая волновая электростанция с электрическим генератором линейного типа, выполненным по обращенной конструктивной схеме

С целью повышения уровня защиты индуктора, магнитопровода и обмотки статора волногенератора от непосредственного контакта с водой волногенератор может быть выполнен по обращеннной схеме [8] (рис. 3). В данной схеме корпус генератора размещается над поверхностью воды. Генератор состоит из поплавка 1, корпуса генератора 2 с верхней 3 и нижней 4 крышками с отверстиями в них и статора 5 с сердечником магнитопровода и обмоткой, размещенной внутри корпуса генератора 2.

Индуктор 6 размещен на неподвижном штоке 7, закрепленном на фундаменте 8. С поплавком жестко соединен корпус с магнитопроводом и обмоткой, а индуктор, жестко закрепленный на фундаменте, неподвижен. Таким образом, возвратно-поступательные движения вместе с поплавком совершает статор и обмотка генератора. Благодаря этому повышается надежность и безотказность работы волногенератора, устраняются потери мощности на преодоление сил сопротивления движению подвижной части волногенератора.

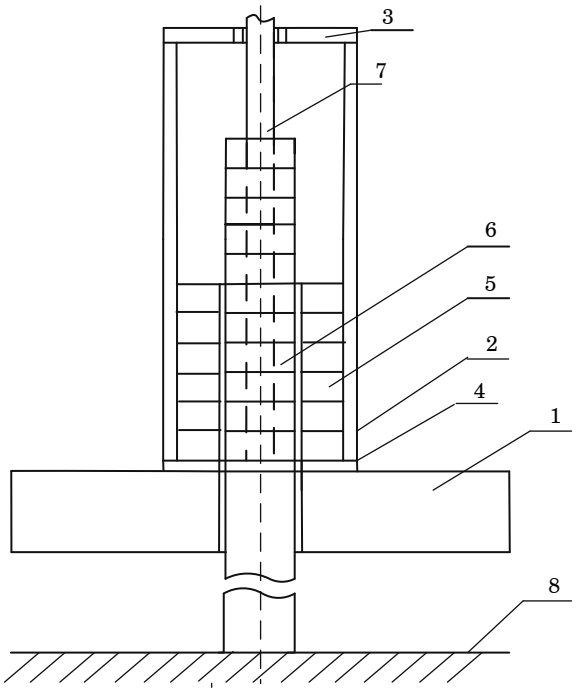


Рис. 3. Поплавковый волногенератор с электрическим генератором линейного типа, выполненный по обращенной конструктивной схеме

Масса подвижной части волногенератора, выполненного по обращенной конструкции, включает массу корпуса генератора, статора с катушками обмотки и сердечником магнитопровода статора, а также массу наружного витого магнитопровода статора. Совершенно очевидно, что масса подвижной части волногенератора обращенной конструкции больше массы подвижной части волногенератора традиционной конструкции. Благодаря этому потенциальная энергия, запасаемая подвижной частью волногенератора при движении ее от впадины к гребню, у генератора обращенной конструкции существенно выше, что повышает эффективность работы его при движении поплавка от гребня до впадины волны по сравнению с волногенератором традиционной конструкции.

Энергия поплавка при его движении от впадины до гребня волны $Q_{п}$ расходуется на выработку электрической энергии $Q_{э.э}$ и накопление потенциальной энергии подвижной части волногенератора $Q_{п.э}$, которая при движении поплавка от гребня до впадины расходуется на выработку электрической энергии. В первом приближении можно принять равенство $Q_{э.э}= Q_{п.э}$ и равенство:

$$Q_{п}=2Q_{э.э}. \quad (1)$$

Энергия поплавка пропорциональна произведению выталкивающей силы поплавка $F_{п}$ и длины пути перемещения поплавка, равной удвоенной амплитуде волны 2А, т. е.

$$Q_{п}=F_{п}\cdot 2A. \quad (2)$$

Выталкивающая сила поплавка:

$$F_{п}=V_{п}\cdot g, \quad (3)$$

где $V_{п}$ – объем поплавка; g – ускорение свободного падения.

Электрическая энергия, вырабатываемая генератором $Q_{э.э}$, прямо пропорциональна мощности, вырабатываемой генератором $P_{г}$, и обратно пропорциональна скорости перемещения волны $\upsilon_{волн}$, т. е.

$$Q_{э.э} = P_{г}/ \upsilon_{волн}, \quad (4)$$

Учитывая, что скорость перемещения волны $\upsilon_{волн}=4A/T_{в}$, можно определить электрическую энергию, вырабатываемую генератором, по формуле (5):

$$Q_{э.э} = P_г T_в / 4A, \quad (5)$$

С учетом соотношений (1)–(3) и (5) можно рассчитать требуемое значение объема поплавка:

$$V_п = P_г \cdot T_в / (4A \cdot g \cdot \eta_{п.в.э}), \quad (6)$$

где $\eta_{п.в.з}$ – КПД поплавковой волновой электростанции.

Поплавковые волновые электростанции с генераторами вращательного типа [9–11] обладают более высокими технико-экономическими показателями в части использования энергии магнитного поля индуктора по сравнению с генераторами линейного типа. Различают два типа волногенераторов с электрическими генераторами вращательного типа:

– генераторы вращательного типа при разнонаправленном вращении вала генератора на интервале одного периода волны;

– генераторы вращательного типа при однонаправленном вращении вала генератора.

Поплавковая волновая электростанция с генератором вращательного типа при разнонаправленном вращении вала генератора на интервале одного периода волны

Рассмотрим устройство и принцип работы поплавковой волновой электростанции с генератором вращательного типа, направление вращения вала которого изменяется при смене каждого полупериода волны [9]. На рис. 4 приведена конструктивная схема поплавковой волновой электростанции с генератором вращательного типа при разнонаправленном вращении вала генератора на интервале одного периода волны.

Поплавковая волновая электростанция выполнена с двумя поплавками (1 и 2), соединенными со штоками (3 и 4) и тросами (5 и 7). Тросы намотаны на барабаны (6 и 8) в разные направления. Поплавки размещены в пространстве со сдвигом, равном половине длины морской волны.

При движении одного поплавка от впадины волны к гребню волны под действием выталкивающей силы, второй поплавок перемещается от гребня волны к впадине очередной волны и т. д. Преобразование линейного перемещения поплавков во вращательное движение вала генератора осуществляется с помощью тросов, намотанных на барабаны, закрепленных на одном валу. При движении поплавка 1 вверх, от впадины волны к гребню волны, шток 3 перемещается вверх, увлекая за собой трос 5 первого барабана 6. Трос 5 первого барабана 6 разматывается и приводит во вращение барабаны 6 и 8, закрепленные на общем валу 13. Барабаны при движении одного поплавка вверх совершат N оборотов, причем N=2A/L, где A – амплитуда волны, а L – длина окружности поверхности барабана, на которую наматывается трос. Вращение барабанов приводит во вращение входной и выходной валы мультипликатора 14, а также ротор синхронного генератора 16. Волновая электростанция снабжена балками 19 и 20, закрепленными на вертикальных стойках 21 и 22, верхние концы которых закреплены на горизонтальной опоре 23, а нижние концы закреплены в фундаменте доковой электростанции 24. На горизонтальной опоре 23 установлены выпрямитель 25 и модуль внешних коммуникаций 26.

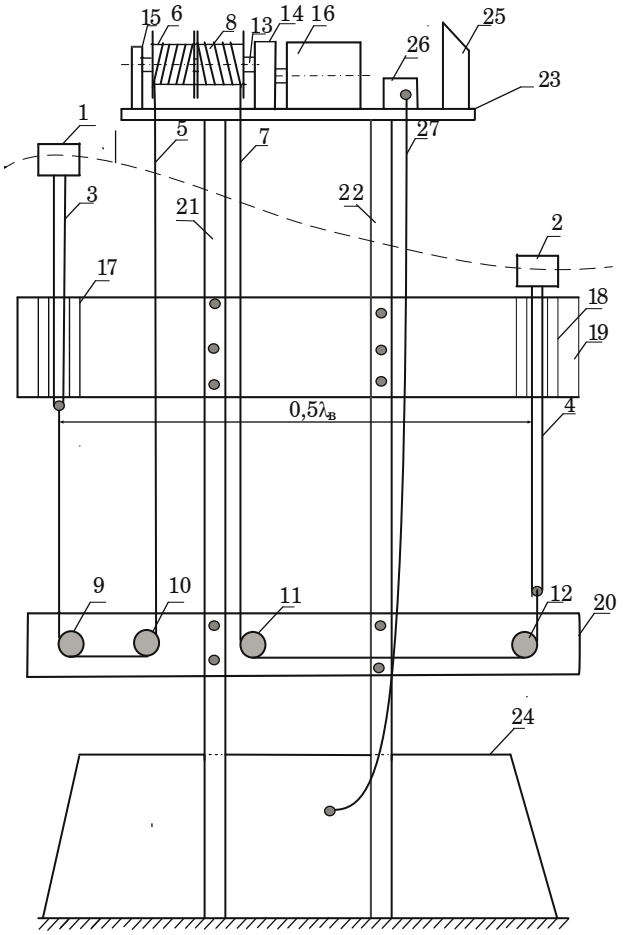


Рис. 4. Поплавковая волновая электростанция с генератором вращательного типа при разнонаправленном вращении вала генератора на интервале одного периода волны

Поплавковая волновая электростанция с электрическим генератором вращательного типа при однонаправленном вращении вала генератора

Для устранения модуляции амплитуды ЭДС генератора необходимо обеспечить однонаправленное вращение вала генератора независимо от направления перемещения поплавка. Однонаправленное вращение вала генератора повышает качество генерируемой электрической энергии по сравнению с рассмотренными выше тремя типами волновых электростанций.

Для стабилизации частоты напряжения, генерируемого генератором вращательного типа, в [11] предложено использование бесступенчатой передачи и способ управления этим устройством. Подобное решение существенно усложняет кинематическую схему генератора, понижает его надежность и затрудняет реализацию этого решения на практике.

Однонаправленное вращение вала генератора может быть достигнуто в волновой электростанции, конструктивная схема которой приведена в патенте [10]. Эта конструктивная схема приведена на рис. 4. Устройство содержит поплавок 1, диск 2, планку с продольным пазом 3 и упор 4, закрепленный на диске 2. Поплавок 1 соединен с планкой с продольным пазом 3 штоком 5. Вал диска 2 закреплен в подшипнике стойки 6 и соединен с входным валом мультипликатора 7. Выходной вал мультипликатора 7 соединен с валом электрического генератора 8. Диск 2 выполнен с пазом 9, расположенным в радиальном направлении, при этом в пазе 9 размещена кинематическая пара винт 10 – гайка 11, а упор 4 размещен на гайке 11.

Возможен вариант выполнения поплавковой волновой электростанции, при котором диск 2 выполнен без паза 9 и кинематической пары винт 10 – гайка 11, а упор 4 жестко закреплен на диске 2 на расстоянии от центра вращения диска 2, равном амплитуде волны $A_в$.

Волновая электростанция [10] работает следующим образом. При движении поплавка 1, например, от впадины волны до ее вершины, в том же направлении перемещаются шток 5 и планка с продольным пазом 3, оказывая силовое воздействие на упор 4. Упор 4 совершает движение по окружности, радиус которой $R_у$ равен расстоянию упора 4 от центра вращения диска с валом 2, которое в свою очередь равно амплитуде волны. Вращение диска с валом 2 передается на входной вал мультипликатора 7, выходной вал которого передает вращение ротору электрического генератора 8. При перемещении поплавка 1 от впадины волны до ее вершины на расстояние равное двойной амплитуде морской волны $2A_в$, планка 3 с продольным пазом также перемещается на расстояние, равное двойной амплитуде морской волны, а упор 4 совершает движение по окружности, диаметр которой также равен двойной амплитуде морской волны и равен $2R_у$. При работе поплавковой волновой электростанции в условиях изме-

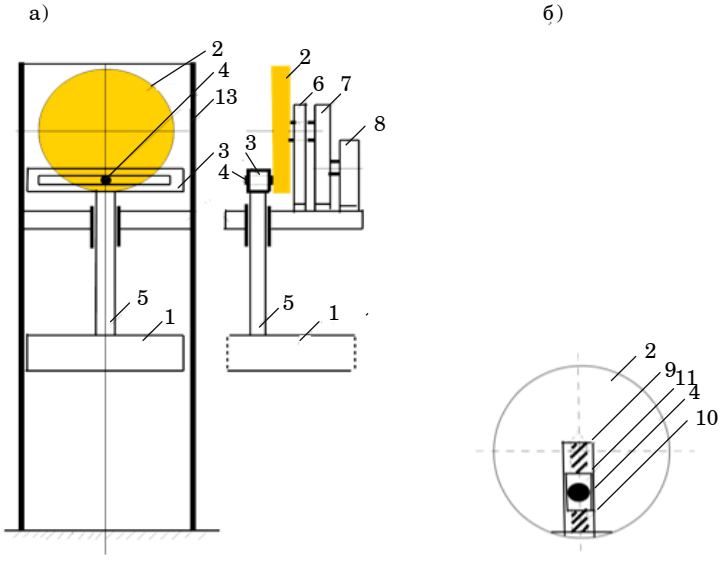


Рис. 5. Поплавковая волновая электростанции с электрическим генератором вращательного типа при однонаправленном вращении вала генератора: а) электростанция в целом; б) диск с кинематической парой винт-гайка

нения амплитуды волны, необходимо регулировать радиус $R_у$. При вращении винта 10 гайка 11 должна быть размещена от центра вращения диска на расстояние, равном амплитуде волны в новых условиях работы.

Отметим существенные достоинства этой волновой электростанции:

– ротор электрического генератора вращается с высокой и постоянной скоростью независимо от направления движения поплавка (вверх или вниз);

– амплитуда напряжения электрического генератора неизменна на всем периоде морской волны.

Скорость вращение ротора генератора n_2 больше скорости вращения диска n_1 в $i_р$ раз, где $i_р$ – передаточное отношение мультипликатора, $i_р = n_2/n_1$.

Скорость вращения диска:

$$n_1 = 60 \cdot f_в = 60/T_в \text{ ,об/мин}, \quad (7)$$

где $T_в$ – период морской волны; $f_в = 1/T_в$ – частота следования морских волн.

При вращении ротора электрического генератора, на котором размещены постоянные магниты, силовые линии магнитного поля ротора пересекают проводники обмотки статора и наводят в них ЭДС, частота которой $f_г$ равна:

$$f_г = n_2 \cdot p_n /60, \text{ Гц}, \quad (8)$$

где n_2 – скорость вращения ротора электрического генератора, об/мин; $p_п$ – число пар полюсов электрического генератора.

Увеличение скорости вращения ротора электрического генератора способствует уменьшению его размеров, поскольку основные размеры электрической генератора обратно пропорциональны скорости вращения ее ротора:

$$D^2 l = \frac{P_{эм} \cdot 60}{n_2 \cdot k \cdot A \cdot B_{\delta\max}}, \quad (9)$$

где $D^2 l$ – объем, ограниченный активной поверхностью расточки статора; $P_{эм}$ – электромагнитная мощность генератора, ВА; A – линейная нагрузка, А/м; $B_{\delta\ max}$ – индукция в зазоре между магнитопроводами статора и ротора, Тл; n_2 – скорость вращения ротора, об/мин; k – коэффициент; l – длина (толщина набора электротехнической стали) магнитопровода статора генератора, м; D – диаметр расточки статора электрической машины, м.

Электрическая энергия, вырабатываемая генератором, передается по кабель-тросу в подводную доковую станцию для заряда аккумуляторных батарей доковой станции.

Заключение

Рассмотрены основные типы поплавковых волновых электростанций, которые могут быть рекомендованы для систем энергообеспечения различных индивидуальных потребителей электрической энергии мощностью от сотен Ватт до нескольких кВт, находящихся в море на удалении от берега и расположенных в береговой зоне.

Библиографический список

1. *Зенин В. Ю.* Разработка элементов подводных робототехнических резидентных систем на примере отечественного автономного необитаемого подводного аппарата и интервенционного класса и сопутствующих технологий // Морская робототехника. Международная конференция по морской робототехнике в освоении океана. 17–19 сентября 2019. СПб., 2019.

2. *Елисеев А. В., Велькин В. И., Шеклеин С. Е.* Разработка исследовательского волнового буя для мониторинга акватории мира // Сб. трудов Всероссийской НПК «Развитие Арктики и приполярных регионов». Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 214–216.

3. *Бочаров А. Ю.* Современные тенденции в развитии миниатюрных подводных аппаратов и роботов за рубежом // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 36–52.

4. *Мартынов А. А., Самсыгин В. К.* Волногенератор поплавкового типа // Труды Крыловского государственного научного центра. 2014. № 81(365). С. 132–142.

5. *Мартынов А. А., Самсыгин В. К.* Основы методики расчета волногенератора поплавкового типа. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. № 3(385). С. 115–121.

6. Методика расчета потерь холостого хода волногенератора поплавкового типа / А. А. Мартынов [и др.] // Завалишинские чтения-19. СПб.: ГУАП, 2019.

7. Патент РФ №196586U1. Поплавковая волновая электростанция / Мартынов А. А. Кл. F03B13/18. Опубл.2020.03.06. Бюл. № 7.

8. Патент РФ №202538. Поплавковая волновая электростанция / Мартынов А. А. Кл. F03B13/18. Опубл.2021.02.24.Бюл. № 6.

9. Патент РФ №205664 U1. Поплавковая волновая электростанция / Мартынов А. А. Кл. F03B13/18. Опубл. 27.07.2021. Бюл. № 21.

10. Патент РФ №211319 U1. Поплавковая волновая электростанция / Мартынов А. А. Кл. F03B13/18. Опубл. 05.31.2022. Бюл. № 16.

11. Патент KR 101684144 B1. Высокоэффективный генератор энергии волн с использованием бесступенчатой передачи и способ его управления. Кл. F03B13/18. Опубл. 07.12.2016.

УДК 681.5.032 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-257-263**

Д. С. Положенцев*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Векторная широтно-импульсная модуляция представляет собой эффективный метод управления трехфазным электродвигателем. Настоящая статья посвящена математическому моделированию алгоритма вычисления скважностей необходимых для реализации векторной широтно-импульсной модуляции, ориентированной на управление синхронным трехфазным электродвигателем. В работе представлена проблематика и дана детальная формулировка алгоритма. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования и оптимизации систем управления реализованными на базе синхронной трехфазной электрической машины.
Ключевые слова: *широтно-импульсная модуляция, трехфазный система, математическое моделирование, синхронный трехфазный электродвигатель.*

D. S. Polozhentcev*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SIMULATION OF SPACE VECTOR MODUTALION ALGORITHM

Vector pulse-width modulation is an effective method for controlling a three-phase electric motor. This paper is devoted to mathematical modeling of the algorithm for calculating the duty cycle required to implement vector pulse-width modulation aimed at controlling a synchronous three-phase motor. The paper presents the problem and provides a detailed formulation of the algorithm. The results obtained can be used to design and optimize control systems implemented on the basis of a synchronous three-phase motor.
Keywords: *pulse width modulation, three-phase electric power, mathematical modeling, synchronous three-phase motor.*

При использовании синусоидальной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для формирования линейных напряжений трехфазной системы, значение их максимальной амплитуды получается меньше, чем значение напряжения источника постоянного тока. Подтверждение данного утверждения представлено на рис. 1 и 2, изображающих графики фазных и линейных напряжений, полученных в ходе моделирования синусоидальной ШИМ в пакете Matlab/Simulink (схема моделирования приведена на рис. 3). В качестве источника управляющих напряжений используется 3-F Generator совместно с PWM Generator. Напряжение источника постоянного тока ($U_{ИП}$) принято равным 27 В, в качестве нагрузки использована трехфазная активно-индуктивная нагрузка со следующими параметрами: R = 0,5 Ом, $L = 10^{-3}$ Гн. Для измерения мгновенных значений напряжений применяются фильтры Z1-Z6 с постоянной времени 0,0005 с. Частота ШИМ $f_{ШИМ}$ = 25кГц.

Видно, что амплитуда линейных напряжений составляет всего ≈23 В, то есть происходит недоиспользование напряжения источника постоянного тока примерно на 14%.

Выходные трехфазные напряжения относительно нуля источника постоянного тока, изображенные на рис. 1, определяются по формулам:

$$U_{\text{ВХА}} = \frac{U_{ИП}}{2}(1+\sin\omega t),$$

$$U_{\text{ВХВ}} = \frac{U_{ИП}}{2}(1+\sin(\omega t - 2\pi/3)),$$

$$U_{\text{ВХС}} = \frac{U_{ИП}}{2}(1+\sin(\omega t + 2\pi/3)).$$

Линейные напряжения, подаваемые на нагрузку, определяются как:

$$U_{\text{А-В}} = U_{\text{ВХА}} - U_{\text{ВХВ}},$$

$$U_{\text{В-С}} = U_{\text{ВХВ}} - U_{\text{ВХС}},$$

$$U_{\text{С-А}} = U_{\text{ВХС}} - U_{\text{ВХА}}.$$

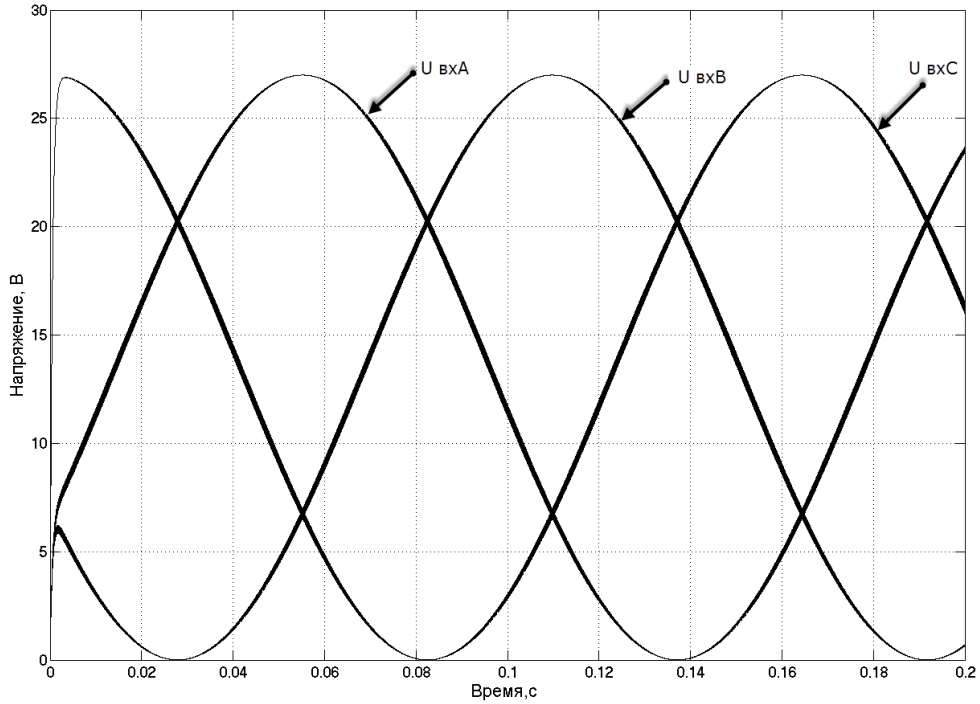


Рис. 1. Графики фазных напряжений на нагрузке относительно нуля источника постоянного тока

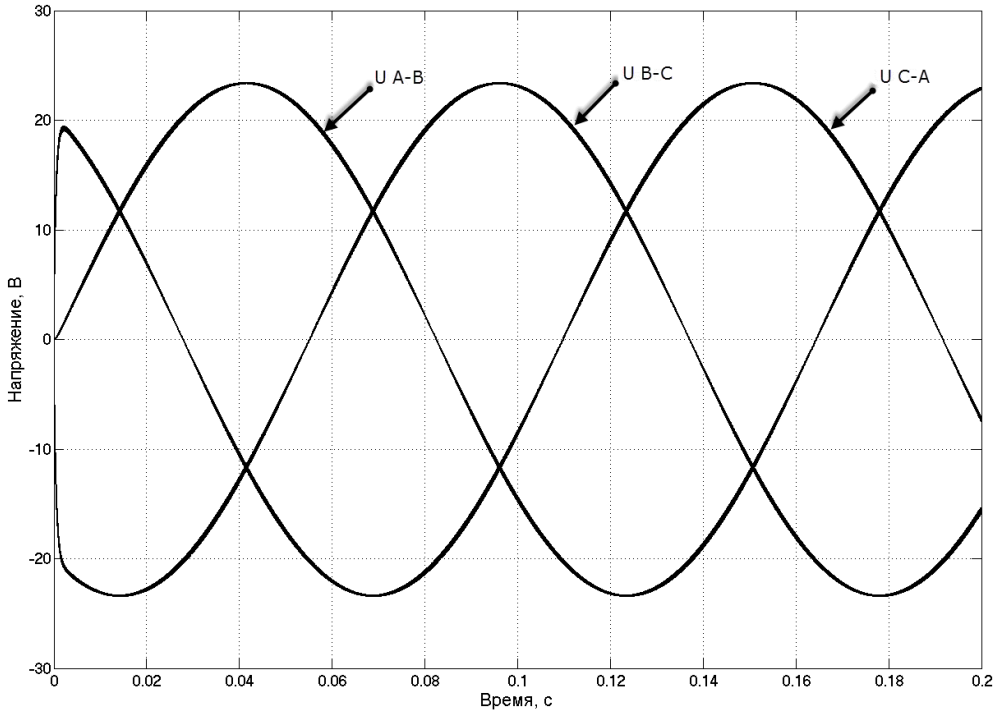


Рис. 2. Графики линейных напряжений

Суть метода, получившего название ШИМ базовых векторов (векторной ШИМ), состоит в отказе от одновременной коммутации всех ключей инвертора и переходе к коммутации между несколькими, заранее выбранными состояниями, каждое из которых соответствует определенному пространственному положению вектора результирующего напряжения. [1]

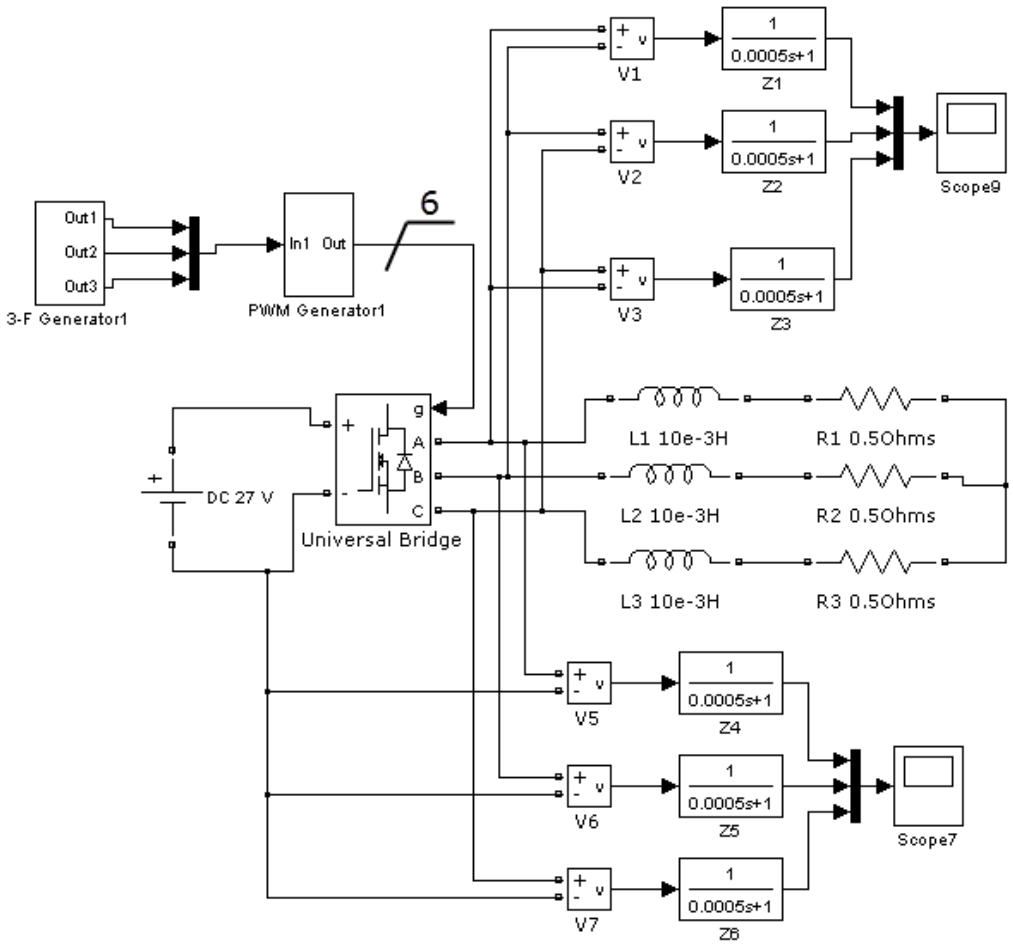


Рис. 3. Схема моделирования синусоидальной ШИМ в пакете Simulink

Имея восемь базовых векторов, два из которых «нулевые», а остальные сдвинуты в пространстве на 60°, можно воспроизвести любой вектор напряжения путем переключения на периоде ШИМ между двумя базовыми векторами текущего сектора $V_{б1}$ и $V_{б2}$ и двумя нулевыми векторами. Амплитуда и фаза результирующего вектора зависят исключительно от скважности включения базовых векторов. На рис. 4 представлены ненулевые базовые векторы в неподвижной системе координат. В трехфазной симметричной системе фазные нагрузки равны, а, значит, амплитуда всех ненулевых базовых векторов составляет $2 \cdot U_{ИП}/3$. [2, 3]

Формирование требуемого вектора напряжения $\overline{U_S}$ осуществляется путем синтеза, основанного на расчете длительностей базовых векторов. Набор используемых базовых векторов определяется сектором угла, в котором расположен требуемый вектор. На рис. 5 представле-

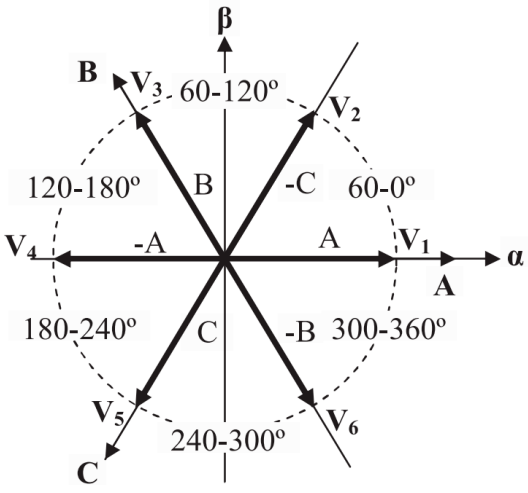


Рис. 4. Ненулевые базовые векторы

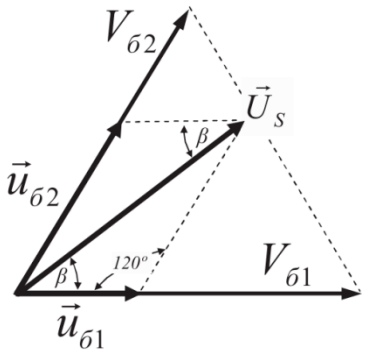


Рис. 5. Представление заданного вектора напряжения как суммы базовых векторов

но разложение вектора напряжения $\overline{U_S}$ на базовые векторы.

Величины базовых составляющих вектора напряжения определяются как:

$$\left|\overline{u_{b1}}\right| = \frac{2}{\sqrt{3}}\left|\overline{U_S}\right|\sin(60° - \beta),$$

$$\left|\overline{u_{b2}}\right| = \frac{2}{\sqrt{3}}\left|\overline{U_S}\right|\sin(\beta).$$

При этом максимальная амплитуда вектора $\left|\overline{U_S}\right|$ имеет минимум, равный $U_{ИП}/\sqrt{3}$, в середине сектора (β = 30°). В трехфазной системе типа «звезда» фазное напряжение отличается от линейного на $\sqrt{3}$. Следовательно, напряжение источника постоянного тока будет использовано полностью [4].

Для того чтобы вычислить время подключения (иногда употребляется термин – «реализовать коммутационную функцию») каждой из фаз к плюсу питания – T_{A+}, T_{B+} и T_{C+}, необходимо вычислить следующие промежуточные переменные:

$$\begin{cases} t_1 = T_{б1} + T_{б2} + \dfrac{T_0}{2} \\ t_2 = T_{б2} + \dfrac{T_0}{2} \\ t_3 = T_{б1} + \dfrac{T_0}{2} \end{cases},$$

где длительности $T_{б1}$, $T_{б2}$ и T_0 определяются как:

$$\begin{cases} T_{б1} = U_S \sin(60° - \beta) \\ T_{б2} = U_S \sin(\beta) \\ T_0 = 1 - T_{б1} - T_{б2} \end{cases}.$$

Длительности T_{A+}, T_{B+} и T_{C+} определяются значениями t_1, t_2 и t_3 в зависимости от величины β, показанной в табл. 1.

Путем ряда упрощений данный алгоритм может быть оптимизирован для работы на одном такте дискретизации системы и скорректирован для работы с кодом датчика угла: коммутационная функция в качестве входных сигналов принимает 16-разрядный код электрического углового положения ротора двигателя (то есть углового положения с учетом числа пар полюсов) alpha и n-разрядный код вектора напряжения Us, который нормируется в пределах от –T/2 до T/2, где T – период центрированной ШИМ.

За счет того, что вектор $\overline{U_S}$ симметричен, можно упростить табл. 1, введя условие: в том случае, если номер сектора N_S больше двух, то необходимо выполнить следующие преобразования:

$$\begin{cases} N_S = N_S - 3 \\ U_S = -U_S \end{cases}.$$

Для сокращения расчетов и приданию алгоритму более «лаконичной формы» можно также ввести следующие обозначения:

$$T_s = T_{б1} + T_{б2},$$
$$T_m = T_{б1} - T_{б2}.$$

После проведения ряда арифметических упрощений и сокращений можно получить алгоритм для расчета скважностей векторной ШИМ (коммутационной функции), представленный далее (реализован на языке программирования Matlab).

```
function [Ta, Tb, Tc]= fcn(alpha, Us)

% Определяем сектор окружности
alpha = mod(alpha, 2^16);
Sector = int16(fix(alpha *6/2^16));

% Переходим к полуокружности
if Sector > 2
    Sector = Sector - 3;
```

Таблица 1

Сектор, град	0…60	60…120	120…180	180…240	240…300	300…360
T_{A+}	t_1	t_3	$T_0/2$	$T_0/2$	t_2	t_1
T_{B+}	t_2	t_1	t_1	t_3	$T_0/2$	$T_0/2$
T_{C+}	$T_0/2$	$T_0/2$	t_2	t_1	t_1	t_3

```
    Uq = -Uq;
end

% Вычисляем угловое положение
alpha = mod(alpha * 6, 2^16);
alpha = alpha/256;
Alpha_rad = (alpha * pi/3)/2^8;

% Вычисляем длины базовых векторов
Uy = sin(alpha_rad) * Us;
Ux = sin(pi/3 - alpha_rad) * Us;

% Вводим замены
Ts = Ux + Uy;
Tm = Ux - Uy;

% Вычисляем скважности
if Sector == 0
    Ta = -Ts + T/2;
    Tb = Tm + T/2;
    Tc = Ts + T/2;
elseif Sector == 1
    Ta = -Tm + T/2;
    Tb = -Ts + T/2;
    Tc = Ts + T/2;
else
    Ta = Ts + T/2;
    Tb = -Ts + T/2;
    Tc = Tm + T/2;
end
end
```

Схема моделирования векторной ШИМ в пакете Simulink представлена на рис. 6. Управляющие напряжения формируются с помощью 3-F Vector Generator, работающим совместно с блоком PWM Generator, который реализует алгоритм, описанный ранее.

На рис. 7 изображены графики фазных напряжений на нагрузке относительно нуля источника постоянного тока.

На рис. 8 изображен график напряжения средней точки трехфазной симметричной нагрузки типа «звезда» относительно нуля звена постоянного тока.

На рис. 9 представлены графики линейных напряжений, формируемых на трехфазной симметричной нагрузки типа «звезда».

Можно наблюдать, что выходные напряжения инвертора имеют несинусоидальную форму, при этом средняя точка нагрузки смещается по треугольной траектории с частотой третьей гармоники фазного напряжения. Линейные напряжения, имеют синусоидальную форму, сдвиг фаз между ними составляет 120°, а их амплитуда равна 27 В, что говорит о максимально эффективном использовании напряжения ис-

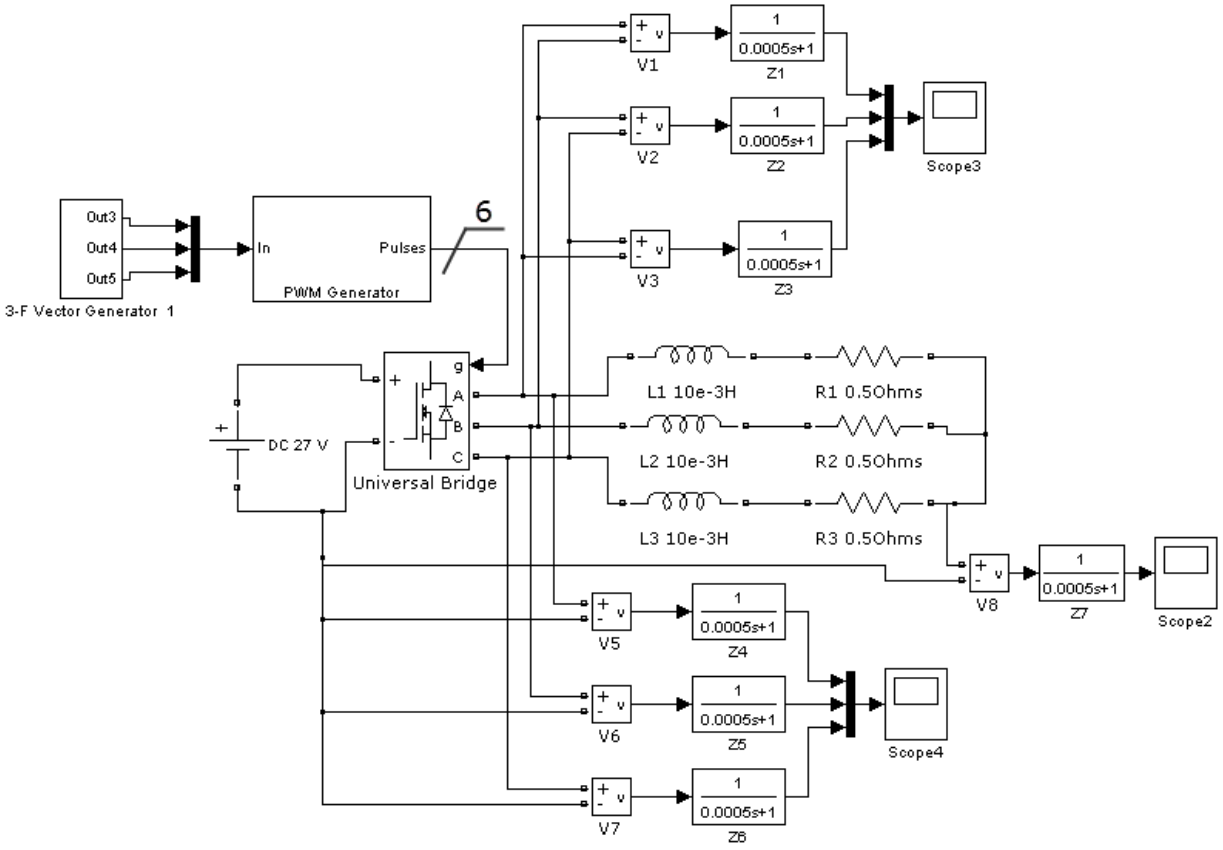


Рис. 6. Схема моделирования векторной ШИМ в пакете Simulink

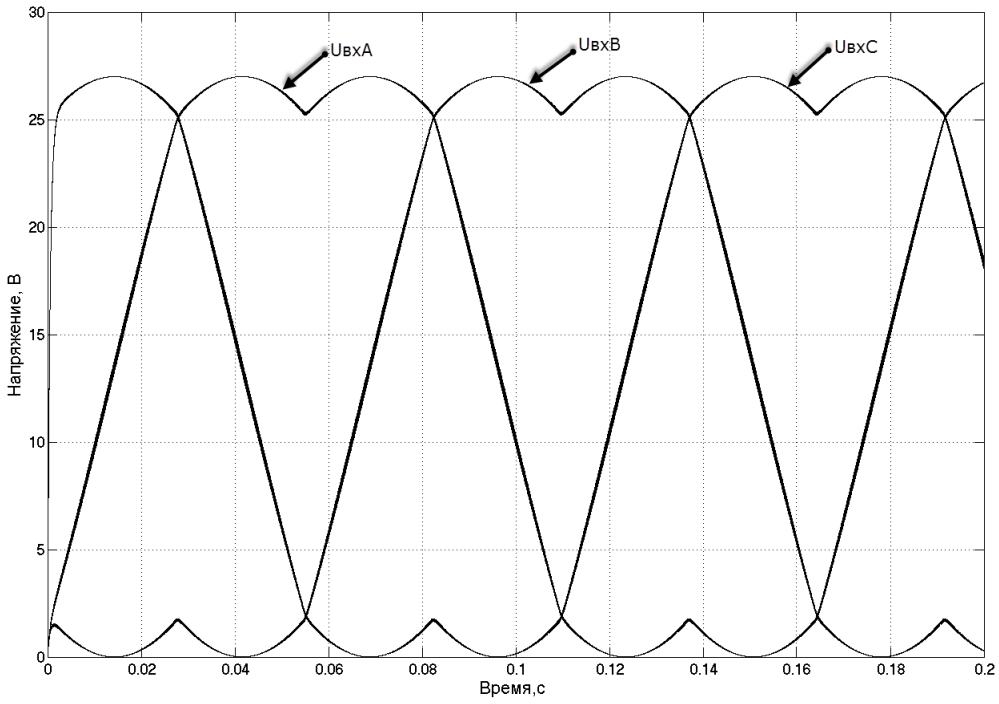


Рис. 7. Графики фазных напряжений на нагрузке

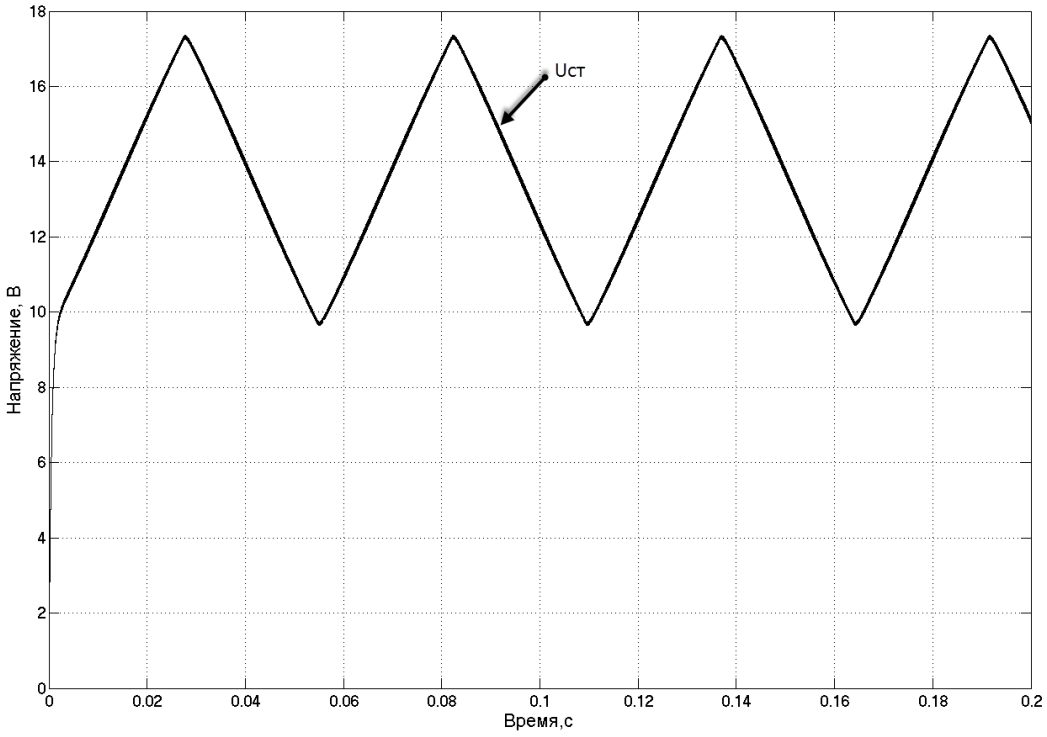


Рис. 8. График напряжения средней точки

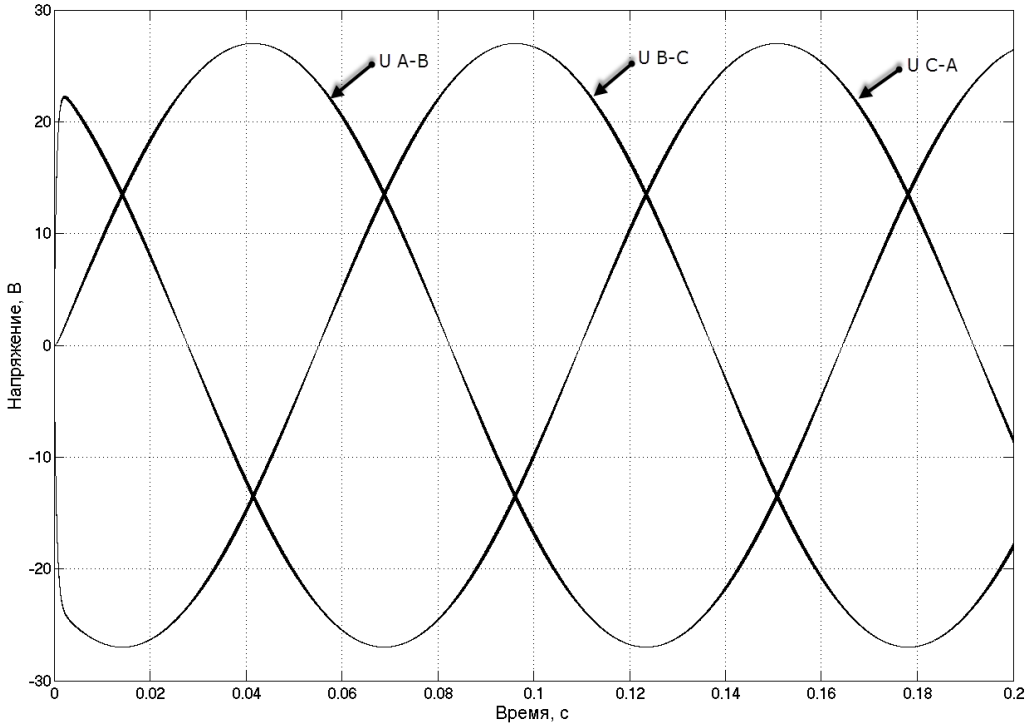


Рис. 9. Графики линейных напряжений

точника постоянного тока. Представленный же алгоритм характеризуется несложной структурой, что облегчает его реализацию и не требует значительных вычислительных мощностей для его функционирования, что делает его привлекательным для широкого спектра применений.

Библиографический список

1. *Козаченко В. Ф.* Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам // Chip News. 1999. № 1.

2. *Gupta A. K., Khambadkone A. M.* A General Space Vector PWM Algorithm for Multilevel Inverters Including Operation in Overmodulation Range // IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 517–526.

3. *Калачев Ю. Н.* Векторное регулирование (заметки практика). М.: ЭФО, 2013.

4. *Виноградов А. Б.* Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: Ивановский гос. энерг. ун-т им. В. И. Ленина, 2008.

5. *Герман-Галкин С. Г.* Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Корона-Век, 2008.

УДК 681.50 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-264-269**

Р. В. Рудаков*
аспирант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НА КВАЗИСКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

В современных приводных системах широтно-импульсная модуляция представляет собой основной метод управления, обеспечивающий высокую точность и эффективность. Цель данной работы заключается в разработке условий, способствующих достижению квазискользящего режима, при котором частота переключения остается конечной, что позволяет избежать проблем, связанных с бесконечно высокой частотой переключения и обеспечивает стабильную работу системы. Исследуются условия назначения частоты широтно-импульсной модуляции и алгоритма управления, поддерживающего устойчивый скользящий режим, с акцентом на идентификацию систем в квазискользящих режимах. Результаты показывают, что правильный выбор частоты широтно-импульсной модуляции значительно улучшает динамическую устойчивость и точность управления. Практическая значимость работы заключается в разработке адаптивных методов управления, способных эффективно реагировать на изменения внешней среды и внутренние параметры системы, что открывает новые возможности для применения в робототехнике и автоматизации.
Ключевые слова: *робот-манипулятор, адаптивное управление, скользящий режим, широтно-импульсная модуляция, квази-скользящий режим.*

P. V. Rudakov*
PhD Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ADAPTIVE CONTROL ON QUASI-SLIDING MODES WITH APPLICATION OF PULSE-WIDTH MODULATION

In modern drive systems pulse width modulation is the main control method providing high accuracy and efficiency. The aim of this paper is to develop conditions that help to achieve a quasi-sliding mode where the switching frequency remains finite, thus avoiding the problems associated with infinitely high switching frequency and ensuring stable system operation. The conditions for assigning the pulse width modulation frequency and control algorithm that maintains a stable sliding mode are investigated, focusing on the identification of systems in quasi-sliding modes. The results show that proper selection of the pulse width modulation frequency significantly improves the dynamic stability and control accuracy. The practical significance of the work lies in the development of adaptive control methods capable of responding effectively to changes in the external environment and internal system parameters, which opens up new opportunities for applications in robotics and automation.
Keywords: *robot manipulator, adaptive control, sliding mode, pulse width modulation, quasi-sliding mode.*

Введение

Управление приводами с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ) стало стандартом в современных робототехнических системах благодаря своей эффективности и простоте реализации. Широтно-импульсная модуляция позволяет осуществлять точное управление мощностью, обеспечивая высокую динамику и точность привода при минимальных потерях энергии [1]. В отличие от традиционных методов управления, ШИМ обеспечивает релейное управление с фиксированной частотой переключения, что позволяет более эффективно управлять динамическими характеристиками систем [2].

Широтно-импульсная модуляция представляет собой метод управления, при котором мощность, подаваемая на двигатель или другой исполнительный механизм, регулируется за счет изменения ширины импульсов при фиксированной частоте переключения. Это позволяет добиться высокой точности управления и эффективного использования энергии [3]. Важным аспектом применения ШИМ является возможность релейного управления, где частота переключения контроллера фиксирована и известна. Это создает определенные преимуще-

ства, но также и ограничения, особенно в контексте динамических систем, где требуется высокая устойчивость и адаптивность к изменениям внешних условий.

Одной из ключевых задач в области управления является достижение квазискользящего режима, при котором частота переключения не является бесконечной, а имеет конечное значение. Квазискользящий режим позволяет избежать проблем, связанных с высокочастотными колебаниями, и обеспечивает более стабильную работу системы [4]. В этом контексте необходимо сформулировать условия, которые позволят назначить частоту ШИМ и алгоритм управления, соответствующий требованиям поддержания устойчивого скользящего режима. Исследования показывают, что правильный выбор частоты переключения может значительно улучшить характеристики системы, такие как динамическая устойчивость и точность [5].

Для достижения устойчивого скользящего режима необходимо учитывать динамические характеристики системы и параметры управления. Идентификация системы в квазискользящих режимах представляет собой сложную задачу, поскольку она требует учета не только статических характеристик, но и динамических изменений, возникающих в процессе работы системы. В этом контексте адаптивные алгоритмы управления, основанные на идентификации, могут значительно повысить эффективность управления в условиях неопределенности и внешних возмущений [6]. Адаптивное управление позволяет системе самостоятельно подстраиваться под изменения внешней среды и внутренние параметры, что делает его особенно актуальным для применения в сложных и нестабильных условиях.

Существующие методы идентификации систем в квазискользящих режимах требуют глубокого анализа и понимания динамических характеристик системы. Например, в работах [7] рассматриваются различные подходы к идентификации динамических систем, которые могут быть адаптированы для работы в квазискользящих режимах. Эти методы позволяют не только улучшить качество управления, но и снизить влияние внешних возмущений, что является критически важным для обеспечения устойчивости системы.

В этой статье авторы делают акцент на разработке условий, необходимых для назначения частоты ШИМ, а также на формулировании алгоритма управления, который будет обеспечивать устойчивый скользящий режим. Будут проанализированы существующие методы управления с использованием ШИМ и их применение в квазискользящих режимах. Важным аспектом исследования станет задача идентификации на квазискользящих режимах, что позволит разработать адаптивное управление, способное эффективно реагировать на изменения в системе и внешней среде.

Таким образом, цель состоит в том, чтобы создать интегрированную модель, которая позволит эффективно использовать ШИМ в управлении на квазискользящих режимах. Это будет способствовать развитию адаптивных методов управления, которые могут быть применены в различных областях, включая робототехнику и автоматизацию.

Модель движения звена робота-манипулятора с электродвигателем постоянного тока

Основные проблемы и особенности управления роботами-манипуляторами в условиях неопределенности их параметров рассмотрим на примере простейшего однозвенного робота, перемещающего груз заранее неизвестной массы.

Расчетная схема звена робота показана на рис. 1. Звено имеет длину L_0 и массу m_0, которая приведена к дальнему от сочленения концу звена. В процессе функционирования к звену может подключаться внешняя масса m_1, которая обычно априорно неизвестна. Массы определяют силы веса F_0 и F_1 и, соответственно, момент нагрузки $M_н(t)$. Электропривод создает вращающий момент $M_0(t)$, под действием которого звено поворачивается на угол $\varphi_0(t)$. Угол отсчитывается от вертикали для того, чтобы состояние $\varphi_0(t)=0$ соответствовало устойчивому положению равновесия звена.

Модель движения звена робота манипулятора возьмем из статьи [9].

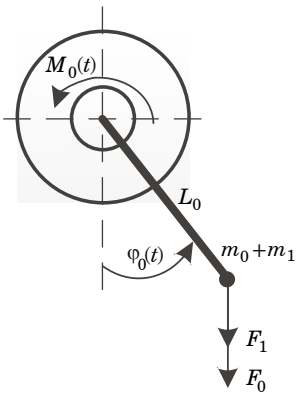


Рис. 1. Расчетная схема звена робота-манипулятора

Квази-скользящий режим для однозвенного манипулятора.

Квази-скользящий режим (КСР) – это подход к управлению, который ослабляет требование повсеместного точного движения скольжения в системах с непрерывным временем. Он направлен на достижение регулятора квазидвигательного режима без аппроксимации и дребезжания. Квазидвигательный режим характеризуется тем, что система выполняет движение, но при этом изменения происходят достаточно медленно по сравнению с динамическими.

Принцип действия регулятора заключается в выборе ускорения, с которым система будет двигаться до момента следующего переключения. Между переключениями движение в системе проходит равноускоренно с попеременным изменением знака ускорения.

Выбор ускорения регулятором основывается на принципах механики, учитывающих динамику системы и внешние силы. Это позволяет обеспечить стабильное и предсказуемое управление манипулятором, что особенно важно в условиях, где необходимо быстро реагировать на изменения и поддерживать точность движений.

Квази-скользящий режим обеспечивает надежное управление неизвестной нелинейной системой без помех без необходимости в сложных методах управления, обучающих агентах или инструментах идентификации системы.

Для нахождения условия квази-скользящего режима для однозвенного манипулятора, необходимо рассмотреть уравнение движения звена. Уравнения движения звена можно записать с помощью второго закона Ньютона и уравнения Эйлера:

Уравнение движения для трансляционного движения звена:

$$m_0 a_0 = F_0 - F_1 - m_0 g \sin(\varphi_0) - m_1 g^* \sin(\varphi_0) - T,$$

где a_0 – ускорение точки сочленения звена, g – ускорение свободного падения, T – сила натяжения троса (если используется).

Трансляционное движение – это движение, при котором все точки тела перемещаются одинаково, то есть тело перемещается как единое целое в пространстве.

Уравнение движения для вращательного движения звена:

$$I_0 {}^* \varphi''_0 = M_0(t) - M_н(t),$$

где I_0 – момент инерции звена относительно его центра масс.

Для перехода к квази-скользящему режиму необходимо учесть силу трения в уравнения движения. Таким образом, уравнения движения будут выглядеть следующим образом:

Уравнение движения для трансляционного движения звена с учетом трения:

$$m_0 a_0 = F_0 - F_1 - m_0 g \sin(\varphi_0) - $$
$$- m_1 g^* \sin(\varphi_0) - T - F_т,$$

где $F_т$ – сила трения.

Уравнение движения для вращательного движения звена с учетом момента трения:

$$I_0 {}^* \varphi''_0 = M_0(t) - M_н(t) - M_т,$$

где $M_т$ – момент трения.

Для перехода к квази-скользящему режиму необходимо, чтобы трение было на много меньше момента инерции звена и внешних моментов, т. е. $M_т << I_0 {}^* \varphi''_0$, $M_0(t)$, $M_н(t)$.

Таким образом, условие квази-скользящего режима для однозвенного манипулятора можно записать как:

$$|M_т| << |I_0 {}^* \varphi''_0|, |M_0(t)|, |M_н(t)|.$$

Алгоритм назначения широтно-импульсной модуляции для однозвенного манипулятора

Для назначения частоты ШИМ, которая обеспечит устойчивый скользящий режим для однозвенного манипулятора, необходимо учитывать динамику системы и характеристики управляемого объекта. Для решения рассмотрим шаги :

1)Определить уравнения движения для манипулятора с учетом внешней массы m_1.

2)Определить управляющий момент. Электропривод создает момент $M_0(t)$, который должен компенсировать момент нагрузки $M_n(t)$ для достижения устойчивого состояния. Это можно выразить как:

$$M_0(t) = M_n(t) + M_{доп},$$

где $M_{доп}$ – дополнительный момент, необходимый для управления и обеспечения устойчивости.

3) Провести анализ устойчивости системы, используя метод Ляпунова. Определить, как изменение частоты ШИМ влияет на динамику системы и устойчивость.

4) Оптимизация частоты ШИМ. Частота ШИМ должна обеспечить достаточную скорость реакции системы на изменения в моменте нагрузки, что достижимое при частоте в 5–10 раз выше частоты собственных колебаний системы, На основе анализа частотной характеристики системы.

5) Произвести импульсный контроль при помощи пропорционально-интегрально-дифференциальные (PID) алгоритмов управления на контроллерах для управления моментом $M0(t)$. Параметры контроллера должны быть настроены с учетом инерции и динамических характеристик исследуемой системы.

Анализа устойчивости системы с помощью функции Ляпунова

Для анализа устойчивости системы выберем функцию Ляпунова[10] следующего вида:

$$V(f, f', Iя) = \frac{1}{2}(J_0 + J_1)\dot{f}^2 + \frac{1}{2}K_0 f^2 + \frac{1}{2}L_я I_я{}^2.$$

Эта функция представляет собой сумму кинетической энергии манипулятора и энергии в электрической цепи.

Теперь найдем производную функции Ляпунова по времени:

$$\frac{dV}{dt} = (J_0 + J_1)\dot{f}\cdot\ddot{f} + K_0 f\cdot\dot{f} + L_я I_я \frac{dIя}{dt}.$$

Используя уравнения движения и электрической цепи, подставим $\ddot{f}(t)$ и $\frac{dI_я(t)}{dt}$ в уравнение (4):

1. Из первого уравнения:

$$f''(t) = \frac{1}{J_0 + J_1}\times$$

$$\times(iK_m I_я(t) - K_0\dot{f} - (m_0 + m_1)gL_0 sin(f(t))).$$

2. Из второго уравнения:

$$\frac{dI_я(t)}{dt} = \frac{1}{L_я}(u_я(t) - R_я I_я(t) - iK_v\dot{f}).$$

Подставляя эти выражения в производную функции Ляпунова, получаем:

$$\frac{dV}{dt} = (J_0 + J_1)\dot{f}(\frac{1}{J_0 + J_1}(iK_m I_я(t) - K_0\dot{f} -$$

$$-(m_0 + m_1)gL_0\sin(f(t)))) + K_0 f\cdot\dot{f} +$$

$$+L_я I_я(\frac{1}{L_я}u_я(t) - R_я I_я(t) - iK_v\dot{f})).$$

Для того чтобы система была устойчивой, необходимо, чтобы производная функции Ляпунова $\frac{dV}{dt}$ была отрицательной определенной. Это означает, что все члены, входящие в $\frac{dV}{dt}$, должны быть направлены на уменьшение энергии системы.

1. Если $u_я(t)$ и $I_я(t)$ выбраны так, чтобы компенсировать моменты и силы, это приведет к уменьшению $f(t)$ и $f'(t)$.

2. Частота ШИМ должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить быструю реакцию системы на изменения в $u_я(t)$ и, следовательно, обеспечить быстрое достижение состояния равновесия.

Влияние частоты ШИМ на устойчивость:

– Высокая частота ШИМ: Позволяет системе быстро реагировать на изменения в управляющем сигнале, что улучшает устойчивость и снижает вероятность колебаний.

– Низкая частота ШИМ: Может привести к инерционным эффектам и замедлению реакции системы, что может вызвать колебания или даже неустойчивость.

Анализ устойчивости с использованием метода Ляпунова показывает, что правильный выбор частоты ШИМ критически важен для обеспечения устойчивого скользящего режима однозвенного манипулятора. Частота должна быть выбрана с учетом динамики системы и характеристик управления, чтобы обеспечить необходимую скорость реакции и избежать колебаний.

Оптимизация частоты широтно-импульсной модуляции для системы управления однозвенным манипулятором

Оптимизация частоты широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для системы управления однозвенным манипулятором требует учета динамики системы, а также характеристик управления.

Частота ШИМ ($f_{ШИМ}$) должна быть выбрана так, чтобы обеспечить быструю реакцию системы на изменения управляющего сигнала и минимизировать колебания. Частота ШИМ может быть связана с динамическими характеристиками системы и частотой собственных колебаний.

Определение частоты собственных колебаний

Для начала, необходимо определить частоту собственных колебаний системы. Это можно сделать, линейзируя уравнение движения манипулятора около точки равновесия. Введем предположение, что $f(t)$ мал и можем исполь-

зовать малые углы ($\sin(f(t)) \approx f(t)$), то уравнение можно упростить:

$$(J_0+J_1)f''(t)+K_0f'(t)+(m_0+m_1)gL_0f(t)=iK_mI_я(t).$$

Характеристическое уравнение

При отсутствии управляющего сигнала (или при его постоянном значении) система будет вести себя как линейная система. Тогда характеристическое уравнение принимает вид:

$$(J_0+J_1)s^2+K_0s+(m_0+m_1)gL_0=0,$$

где s – комплексная частота. Решая это уравнение, найходим собственные частоты системы.

Определение оптимальной частоты ШИМ

Оптимальная частота ШИМ должна быть как минимум в 5–10 раз выше частоты собственных колебаний системы, чтобы обеспечить адекватную реакцию на изменения управляющего сигнала. Если обозначить собственную частоту как ω_n, то оптимальная частота ШИМ может быть определена как:

$$f_{ШИМ} \geq k \cdot \omega_n$$

где k – коэффициент, который можно выбрать в диапазоне от 5 до 10.

Выводы

Оптимизация частоты ШИМ для системы управления однозвенным манипулятором включает в себя определение частоты собственных колебаний, выбор частоты ШИМ, которая должна быть значительно выше этой частоты, и настройку контроллера для обеспечения желаемой динамики. После этого необходимо провести тестирование, чтобы убедиться в устойчивости и эффективности системы.

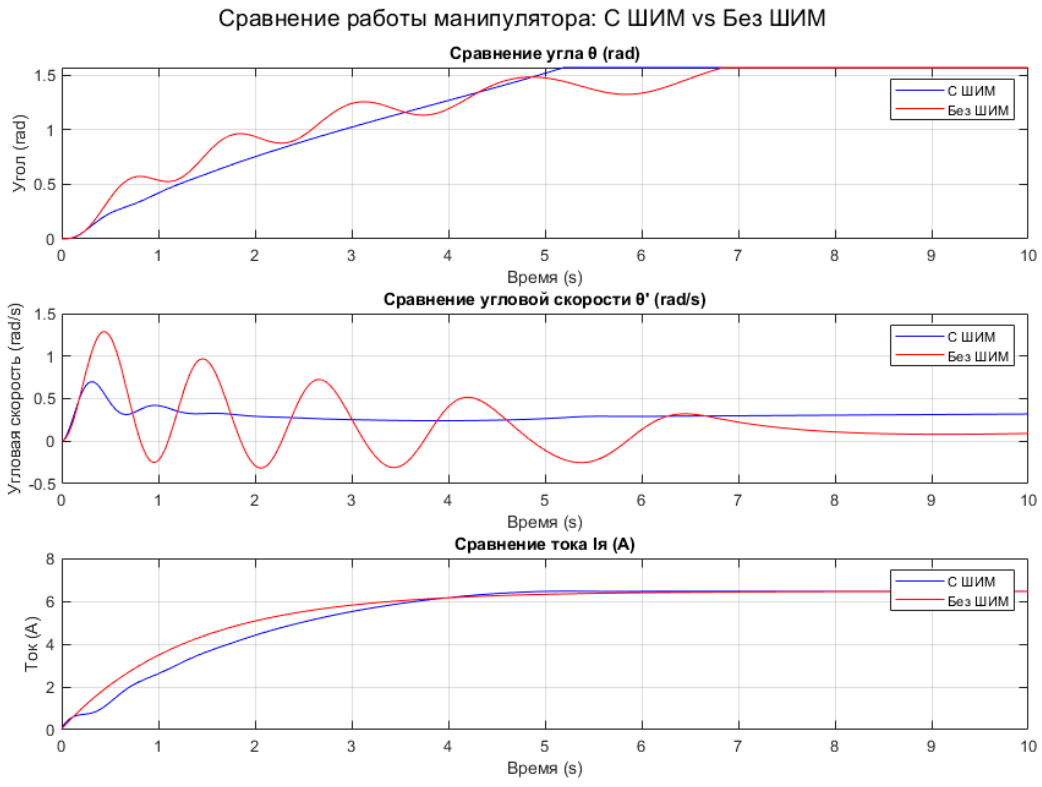
График угла θ (rad):

Угол непрерывно растет до максимума и достигает своего пика на 5-й секунде. Это говорит о том, что система успешно управляет углом звена, эффективно реагируя на управляющее воздействие.

Достижение максимального угла на 5-й секунде также указывает на то, что система может достигать заданного положения, но важно следить за тем, чтобы угол не превышал допустимые пределы, что может привести к механическим ограничениям.

График угловой скорости θ› (rad/s):

Угловая скорость колебалась в течение первой секунды, что может свидетельствовать о



том, что система испытывает трудности с настройкой в начале управления. Это может быть связано с недостаточной настройкой параметров ПИД-регулятора.

После первой секунды угловая скорость становится константой, что указывает на то, что система адаптировалась к условиям управления и теперь поддерживает стабильное значение угловой скорости. Это может свидетельствовать о том, что система достигла состояния равновесия.

График тока $I_я$ (А):

Ток растет до 6 секунды и затем становится константой. Это говорит о том, что система потребляет больше энергии в начале процесса, вероятно, для достижения максимального угла.

Стабилизация тока на уровне 6 секунды может указывать на то, что двигатель работает в стабильном режиме, что также подтверждает, что система успешно управляет углом звена.

График управляющего воздействия (PWM):

Управляющее воздействие колебалось и стало константой на отметке 5 секунд. Это может указывать на то, что система сначала корректирует свои параметры, чтобы достичь желаемого угла, а затем стабилизируется.

Стабилизация управляющего воздействия на уровне 5 секунд также подтверждает, что система достигла целевого состояния и удерживает его, что является положительным признаком.

Заключение

В ходе моделирования системы управления углом звена были получены значительные результаты, подтверждающие научную новизну разработанного алгоритма. Система успешно управляет углом звена, достигая максимального значения на 5-й секунде, что указывает на высокую эффективность алгоритма управления.

Анализ графиков угла, угловой скорости, тока и управляющего воздействия демонстрирует, что система способна достигать заданных целевых параметров. Однако наблюдаемые колебания угловой скорости в начале процесса подчеркивают необходимость оптимизации параметров ПИД-регулятора. Эти колебания свидетельствуют о недостаточной настройке, что подчеркивает важность тщательной калибровки в начальных условиях управления.

После первой секунды угловая скорость стабилизируется, что подтверждает адаптацию системы к изменениям и достижение состояния равновесия. Рост тока до 6-й секунды, за которым следует стабилизация, указывает на то, что двигатель функционирует в стабильном режиме, обеспечивая необходимую мощность для управления углом. Стабилизация управляющего воздействия на уровне 5 секунд подтверждает успешное достижение целевого состояния и высокую эффективность управления.

Таким образом, результаты моделирования демонстрируют, что разработанный алгоритм управления обеспечивает надежное и эффективное управление углом звена, что имеет большое значение для практического применения в системах автоматизации и робототехники.

Библиографический список

1. *Baker S., Johnson T., Smith R.* PWM Control Techniques for Efficient Motor Drives // Journal of Electrical Engineering, 2018, 45(3), 234–240.

2. *Krause M., Müller J.* Relay Control Systems with Fixed Switching Frequency // International Journal of Control, 2020, 93(12), 2764–2775.

3. *Baker C., Smith J., Williams R.* PWM Control Techniques for DC Motors // Journal of Electrical Engineering, 2019, 45(3), 123–134.

4. *Utkin V. I.* Sliding Modes in Control and Optimization. Springer-Verlag, 1992.

5. *Liu J., Wang Y., Zhang L.* Adaptive Control for Nonlinear Systems with Sliding Mode Observer // International Journal of Control, 2018, 91(8), 1785–1795.

6. *Zhang H., Zhao X., Li Y.* Robust Adaptive Control for Nonlinear Systems with Input Nonlinearities // IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 65(4), 1586–1593.

7. *Wang T., Chen Y., Huang X.* Identification and Control of Nonlinear Systems Using Sliding Mode Techniques // Nonlinear Dynamics, 2017, 87(4), 2143–2158.

8. *Рудаков Р. В., Сержантова М. В., Бойков В. И.* Идентификация n-звенных робототехнических манипуляторов // Международный научно-исследовательский журнал, 2024, № 1(139), DOI: 10.23670/IRJ.2024.139.166

9. Адаптивное управление роботами для работы в условиях действия высоких температур / Р. В. Рудаков [и др.] // Информационно-управляющие системы, 2024, (4), 12–23. https://doi.org/10.31799/1684-8853-2024-4-12-23

10. Хоанг Дык Тхинь, Пыркин А. А. Синтез алгоритма робастного управления движением мобильного робота вдоль гладкой траектории // Изв. вузов. Приборостроение, 2022, т. 65, № 7, с. 500–512. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-7-500-512

УДК 621.313 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-270-276**

И. А. Салова*
кандидат технических наук, доцент,
С. Ю. Мельников*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА

В статье исследовано влияние формы паза, количества ампер-витков обмотки и уменьшения ширины крайних зубцов гребенчатого полюса шагового электродвигателя на магнитную проводимость воздушного зазора и ее гармонический состав при двусторонней зубчатости. Приведены результаты моделирования с использованием метода конечных элементов в программном комплексе ELCUT.
Ключевые слова: *шаговый электродвигатель, двухсторонняя зубчатость, магнитная проводимость воздушного зазора, гармонический состав.*

I. A. Salova*
PhD, Tech., Associate Professor
S. Yu. Melnikov*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INFLUENCE OF STEP ELECTRIC MOTOR'S TOOTH ZONE GEOMETRY ON MAGNETIC CONDUCTIVITY'S HARMONIC COMPOSITION IN AIR GAP

The effect of the teeth shape's, the number of winding ampere-turns and the decrease in the comb pole's extreme teeth width of the step motor on the magnetic conductivity of the air gap and its harmonic composition with double-sided teeth is investigated in the article. The results of modeling using the finite element method in the ELCUT software package are presented.
Keywords: *step motor, double-sided teeth, magnetic conductivity of air gap, harmonic composition.*

Шаговые электродвигатели широко применяются во многих отраслях промышленности. Большинство современных шаговых двигателей являются гибридными (ГШД). Поскольку принцип работы таких двигателей основан на изменении сопротивления магнитному потоку в воздушном зазоре при вращении зубчатого ротора относительно полюсов зубчатого статора, геометрия зубцовой зоны оказывает важную роль на их характеристики [1–3].

В частности, погрешность позиционирования ГШД существенно зависит от спектрального состава гармоник его угловой характеристики, которая, в свою очередь, в основном определяется изменением магнитной проводимости в воздушном зазоре (МПВЗ) двигателя. Особенно эта зависимость проявляется в режиме дробления шага. Угловая характеристика – зависимость статического момента, развиваемого двигателем, от угла поворота ротора – содержит важную информацию о функционировании ГШД. По ее виду можно оценить не только статические характеристики двигателя, измеряемые при заторможенном роторе, но и некоторые динамические характеристики, например, пусковой момент. Поэтому поиск оптимальной геометрии зубцовой зоны ГШД, позволяющей уменьшить влияние высших гармоник на синусоиду МПВЗ, снизить пульсации статического момента и повысить точность позиционирования двигателя является весьма актуальной задачей [1-3].

Гибридный шаговый электродвигатель представляет собой индукторный двигатель (рис. 1), на гребенчатых полюсах статора которого размещены катушки фаз обмотки, а на роторе расположен цилиндрический аксиально намагниченный постоянный магнит, к торце-

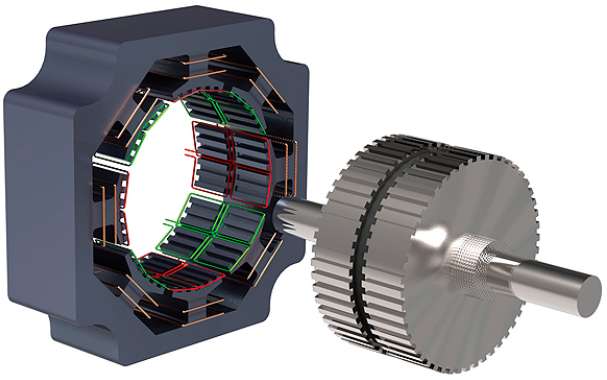


Рис. 1. Конструкция гибридного шагового двигателя

вым поверхностям которого примыкают зубчатые магнитопроводы. Оси зубцов магнитопроводов сдвинуты друг относительно друга на π электрических радиан.

Чаще всего такие двигатели имеют шаг 3.6 градуса или 1.8 градуса (100 или 200 шагов на оборот, соответственно). Большинство контроллеров, управляющих работой ГШД, позволяют работать двигателю в полушаговом режиме, где этот угол вдвое меньше, а некоторые из них обеспечивают также микрошаговый режим, в котором, как отмечалось выше, особенно важно иметь строго синусоидальное распределение МПВЗ.

В некоторых случаях при изготовлении ГШД для обеспечения лучших условий размещения катушек фаз обмотки на гребенчатых полюсах статора шлиц (раскрытие паза) между гребенками выполняют увеличенным за счет уменьшения ширины крайних зубцов гребенок. При изменении величины крайних зубцовых делений полюса статора меняется соотношение фаз гармоник МПВЗ под полюсом. Изменение формы пазов статора и ротора, а также величины ампер-витков обмоток статора также влияет на гармонический состав проводимости. Все это дает возможность скорректировать, при необходимости, гармонический состав магнитного потока в воздушном зазоре двигателя.

Поэтому были сформулированы следующие задачи – исследовать влияние на МПВЗ ГШД:

а) уменьшения величины крайних зубцовых делений за счет ширины зубцов гребенчатого полюса статора;

б) коэффициента увеличения ампер-витков K_{AW} обмотки;

в) формы пазов ротора и пазов гребенчатого полюса статора (прямоугольный, скругленный, овальный).

Исходные данные для расчета МПВЗ ГШД (базовый вариант зубцовой зоны):

– статор – число витков в секции фазы – 34, номинальный ток – 1.5 А; количество полюсов статора – 8, число зубцов на гребенчатом полюсе – n_{zs}=6, зубцовое деление t_{zs}=2.01 мм, ширина зубца b_{zs}=0.81 мм, ширина паза b_{ps}=1.2 мм, высота зубца h_{zs}=0.95 мм, раскрытие шлица

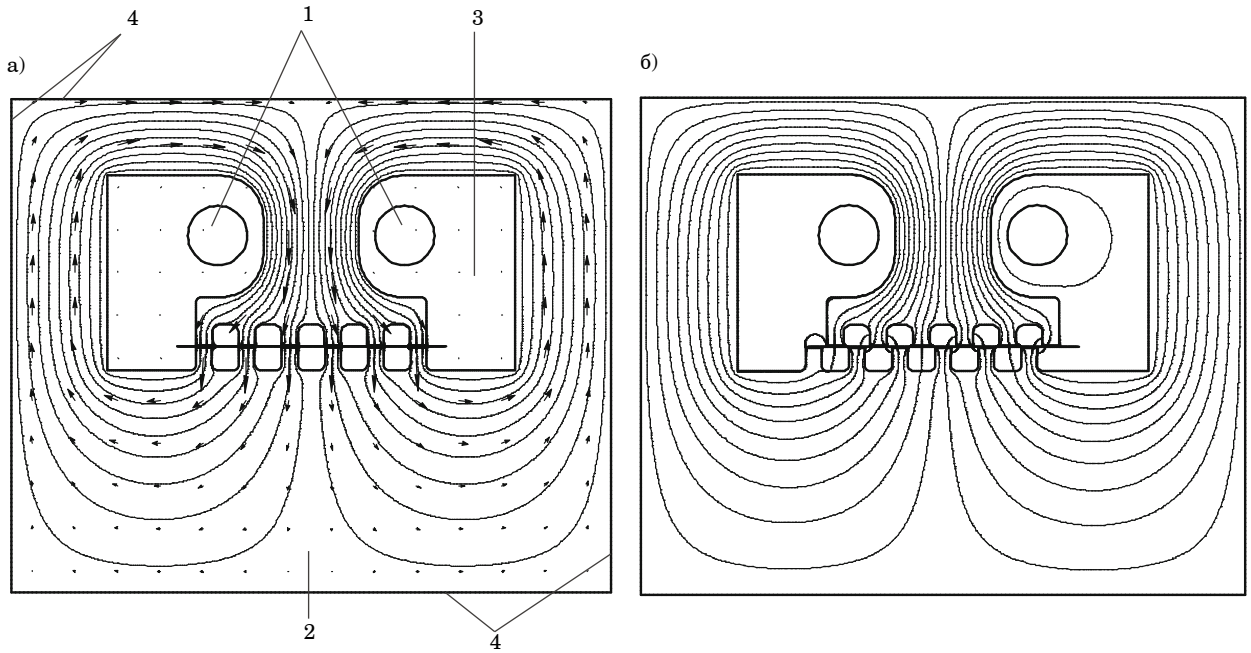
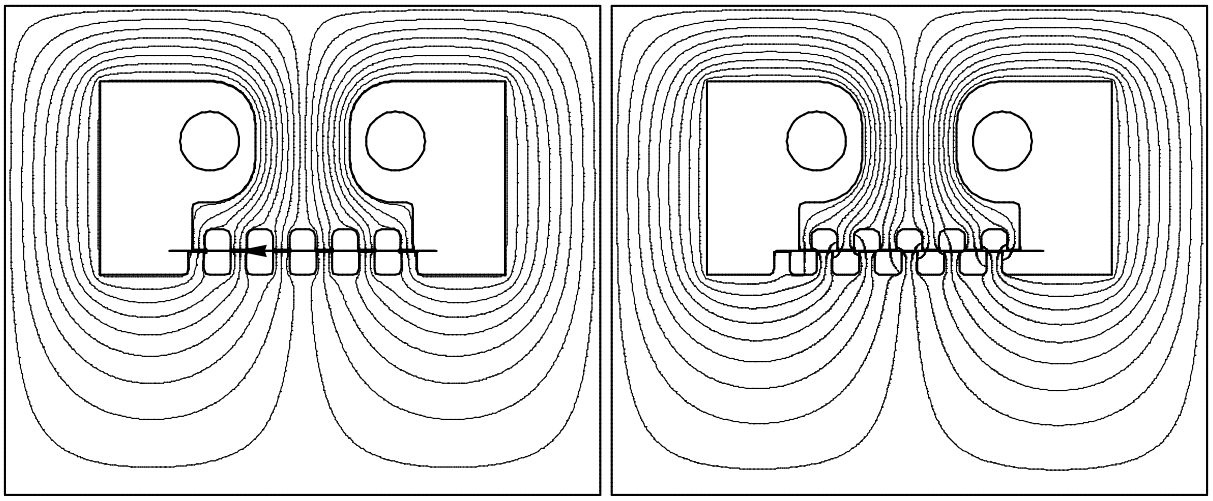


Рис. 2. Магнитное поле полюса ГШД с базовым вариантом геометрии зубцовой зоны в положении: а) зубцы напротив зубцов; б) зубцы напротив пазов



а) б)

Рис. 3. Магнитное поле полюса ГШД с уменьшенной шириной крайних зубцов полюса статора в положении: а) зубцы напротив зубцов; б) зубцы напротив пазов

между полюсами b_s=2.1 мм, диаметр расточки статора D=32 мм, величина воздушного зазора δ=0.07 мм;

– ротор – число зубцов – n_{zr}=50, зубцовое деление b_{zr}=2.0 мм, ширина зубца b_{zr}=0.73 мм, ширина паза b_{pr}=1.27 мм, высота зубца h_{zr}=1.1 мм.

Для увеличения точности позиционирования ГШД зубцовое деление на полюсах статора выполнено несколько больше зубцового деления ротора.

Исследование проводилось с использованием метода конечных элементов [4, 5] в программном комплексе ELCUT v.6.3 [6]. Влияние изменения геометрии зубцовой зоны изучалось на двух моделях: с базовым вариантом геометрии (рис. 2) и с уменьшенными крайними зубцами полюса статора (рис. 3). На рис. 2 показаны: 1 – обмотка с током; 2 – магнитопровод с магнитной проводимостью μ=100000; 3 – воздух; 4 – контур для задания граничного условия отсутствия магнитного поля. Магнитный поток рассчитан на глубину 1 м.

При расчете МПВЗ, ввиду ограничений рассматриваемой двумерной модели, не учитывался поток постоянного магнита вдоль оси ротора. Его влияние может быть учтено в общем магнитном потоке под полюсом за счет изменения ампер-витков обмотки.

За исходное положение ротора относительно статора (α=0) примем их взаимное расположение, указанное на рис. 2, *а*, когда зубцы обоих магнитопроводов расположены строго напротив друг друга. Смещение ротора на величину зубцового деления t_z соответствует 2π электрических радиан (α=2π). Таким образом, задавая дискретно значение угла α в диапазоне 0–2π, можно вычислить смещение ротора $\Delta = \frac{\alpha t_z}{2\pi}$.

Однако, учитывая, что значения проводимости

Таблица 1

Гармонический состав МПВЗ при варьировании шириной крайних зубцов полюса статора

λ_0 (Вб/м) и отношение λ_n/λ_0	Базовый вариант	Величина уменьшения крайних зубцов полюса статора, мм		
		0.1	0.2	0.3
λ_0	0,00267	0,00261	0,002552	0,00250
λ_1/λ_0	0,39431	0,39701	0,394149	0,38639
λ_2/λ_0	0,00584	0,00956	0,011438	0,01097
λ_3/λ_0	0,01573	0,01361	0,011170	0,01040
λ_4/λ_0	0,00529	0,00593	0,004602	0,00332
λ_5/λ_0	0,00050	0,00042	0,000244	0,00010
λ_6/λ_0	0,00158	0,00138	0,001157	0,00179

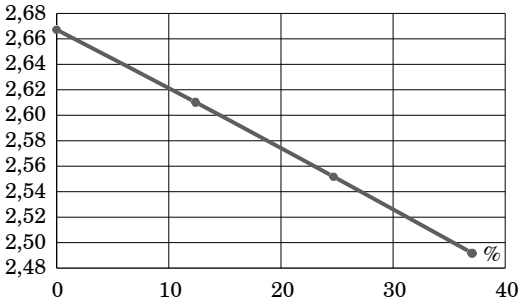


Рис. 4. Зависимость постоянной составляющей магнитного потока от уменьшения ширины крайних зубцов полюса (в %)

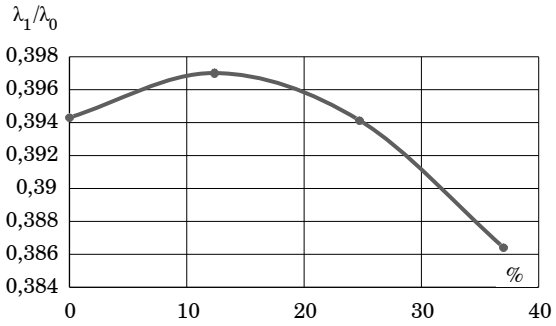


Рис. 5. Зависимость отношения первой гармоники магнитного потока к постоянной составляющей от уменьшения ширины крайних зубцов полюса (в %)

на интервалах 0–π и π–2π в идеальной модели будут зеркально повторяться, ограничимся рассмотрением только интервала 0–π. Угол α=π будет соответствовать такому взаимному расположению ротора и статора, когда зубец статора будет находиться строго напротив паза ротора (рис. 2, *б*).

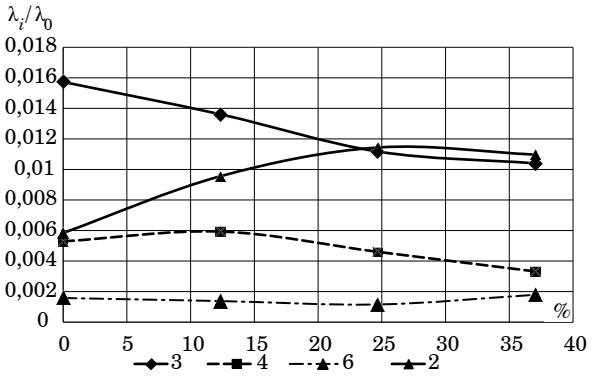


Рис. 6. Зависимость отношения n-ой гармоники (2-й, 3-й, 4-й и 6-й) магнитного потока к постоянной составляющей от уменьшения ширины крайних зубцов полюса (в %)

Для каждого угла α_i в диапазоне [0–2π] вычисляется значение проводимости λ_Σ и формируется одномерный массив $\lambda[i]$, который раскладывается в ряд Фурье. Таким образом, аналитически получается гармонический состав магнитной проводимости воздушного зазора. Разложение магнитного потока проводилось по 73 точкам в диапазоне 0–2π электрических радиан, поэтому значимыми можно считать гармоники до 6 включительно [5].

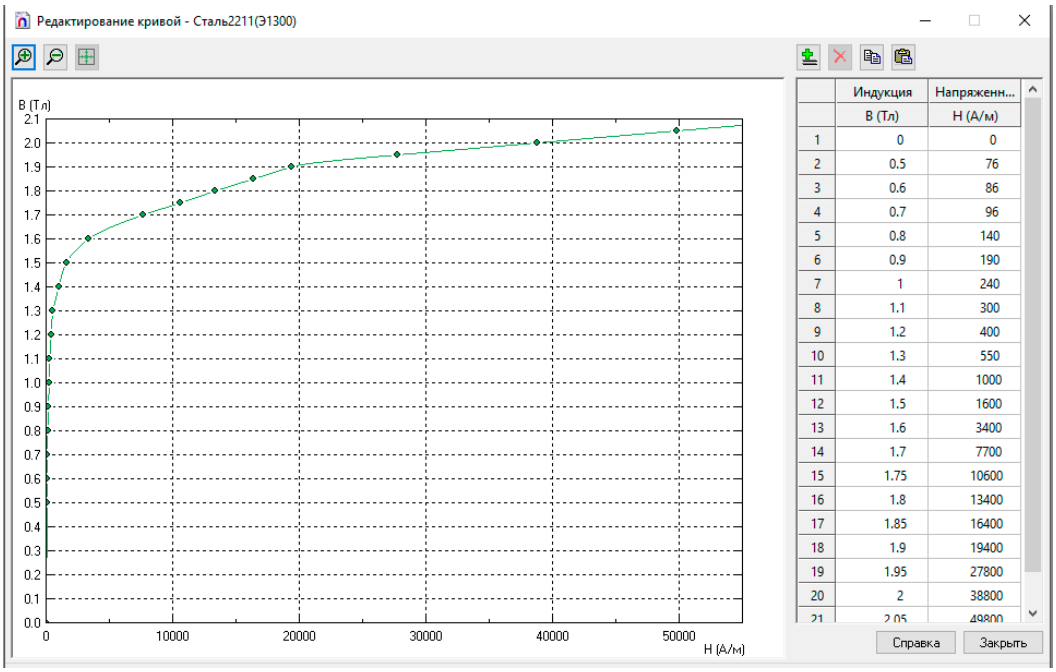


Рис. 7. Кривая намагничивания B=f(H) для стали марки 2211

Таблица 2

Гармонический состав МПВЗ при различных значениях коэффициента увеличения ампер-витков K_{AW}

λ_0 (Вб/м) и отношение λ_i/λ_0	Базовый вариант	K_{AW}			
		1	1.5	2	3
λ_0	0.00267	0.00255	0.00380	0.00492	0.00640
λ_1/λ_0	0,39431	0,380174	0,371639	0,342621	0,216740
λ_2/λ_0	0,00584	0,001837	–0,001841	–0,017807	–0,046963
λ_3/λ_0	0,01573	0,014206	0,013359	0,005815	0,008922
λ_4/λ_0	0,00529	0,004489	0,003960	0,001957	0,001747
λ_5/λ_0	0,00050	0,000309	0,000101	–0,000114	–0,000425
λ_6/λ_0	0,00158	0,001505	0,001382	0,000591	–0,000219

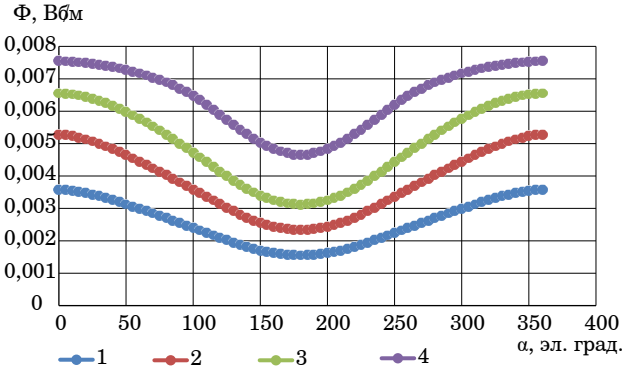


Рис. 8. Зависимость значений магнитного потока от угла поворота α в пределах зубцового деления при различных значениях коэффициента увеличения ампер-витков K_{AW}

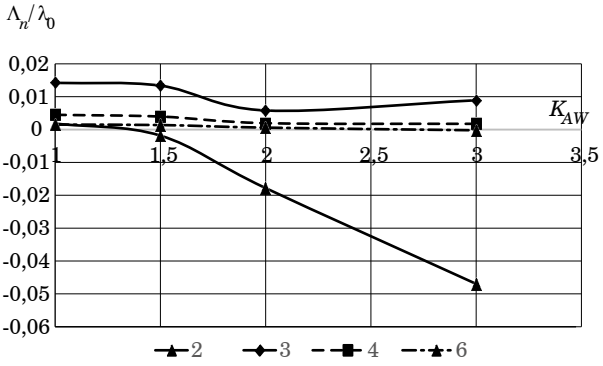


Рис. 10. Зависимость отношения n-ой гармоники (2-й, 3-й, 4-й и 6-й) магнитного потока к постоянной составляющей от коэффициента увеличения ампер-витков K_{AW}

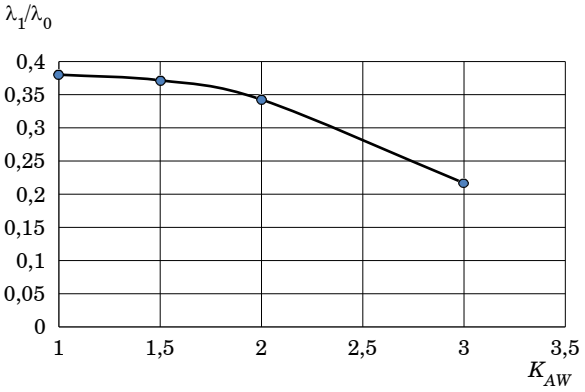


Рис. 9. Зависимость отношения первой гармоники магнитного потока к постоянной составляющей от коэффициента увеличения ампер-витков K_{AW}

Результаты расчета гармоник МПВЗ для базового варианта геометрии и варианта с крайними зубцами уменьшенной ширины на полюсе статора приведены в табл. 1. Интерес представляют постоянная составляющая λ_0, первая гармоника λ_1 а также высшие – 2-я и 4-я гармоники, оказывающие наибольшее влияние на МПВЗ ГШД исследуемой геометрии [7–9].

На рис. 4 представлена зависимость постоянной составляющей, а на рис. 5 и 6 – отношения *n*-й гармоники магнитного потока к постоянной составляющей от процента уменьшения ширины крайних зубцов полюса статора.

Для базового варианта геометрии (без уменьшения ширины крайних зубцов полюса статора) оценим влияние кривой намагничивания магнитопровода, выполненного из стали марки 2211, на гармонический состав МПВЗ под полюсом при изменении тока в обмотке. Кривая намагничивания $B=f(H)$ для стали марки 2211 приведена на рис. 7.

Моделировании различной величины индукции в воздушном зазоре проведено при величине полного тока: 51, 76.5, 102, 153 А. Для удобства анализа графиков введен коэффициент увеличения ампер-витков K_{AW}, принимающий соответственно значения: 1, 1.5, 2 и 3 (рис. 8).

Далее каждая кривая (рис. 8) была разложена в ряд Фурье. В табл. 2 представлены относительные значения первых 6 гармоник разложения в ряд. В таблице гармонический состав МПВЗ приведен для базового варианта геометрии зубцовой зоны и номинальном токе, а также для полюса с уменьшенной на 0.2 мм шириной крайних зубцов при изменении тока в обмотке.

Графики зависимостей постоянной составляющей магнитного потока и относительных значений гармоник при изменении коэффициента увеличения ампер-витков представлены на рис. 9 и 10.

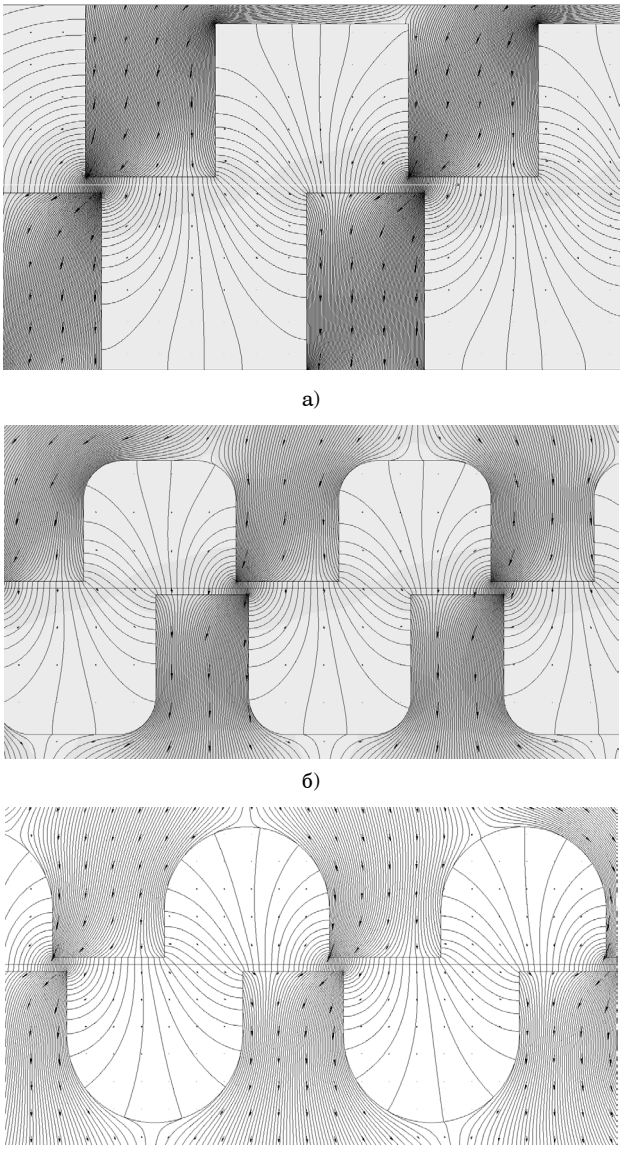
Для оценки влияния формы пазов статора и ротора на гармонический состав проводимости воздушного зазора рассмотрим три варианта их формы (рис. 11).

Результаты расчета влияния формы пазов статора и ротора на гармонический состав МПВЗ для базового варианта зубцовой зоны и при изменения ширины крайних зубцов полюса статора на 0.2 мм сведены в табл. 3.

Выводы

1. Уменьшение ширины крайних зубцов полюса статора в диапазоне 10–25% вызывает уменьшение амплитуд постоянной составляющей и первой гармоники МПВЗ в пределах 5%, при этом амплитуда второй гармоники увеличивается вдвое, а четвертая гармоника ослабляется на 17%.

2. Увеличение количества ампер-витков обмотки статора позволяет компенсировать уменьшение амплитуд постоянной составляющей и первой гармоник МПВЗ, ослабить четвертую гармонику проводимости и подавить вторую.



а)

б)

в)

Рис. 11. Магнитное поле в воздушном зазоре при различной форме пазов статора и ротора: а) прямоугольная форма; б) со скруглениями углов; в) овальная

Таблица 3

Гармонический состав МПВЗ при варьировании формы пазов и ширины крайних зубцов полюса статора

λ_0 (Вб/м) и отношение λ_N/λ_0	Гармоники проводимости при форме паза:					
	со скруглениями		прямоугольном		овальном	
	Базовый вариант	Уменьшен-ная ширина зубцов	Базовый вариант	Уменьшен-ная ширина зубцов	Базовый вариант	Уменьшен-ная ширина зубцов
λ_0	0.0267E-03	0.0255E-03	0.0267E-03	0.0255E-03	0.0267E-03	0.0255E-03
λ_1/λ_0	0,39431	0,394149	0,39441	3,93817E-01	0,39271	0,39254
λ_2/λ_0	0,00584	0,011438	0,00588	1,17879E-02	0,00590	0,01144
λ_3/λ_0	0,01573	0,011170	0,01568	1,08375E-02	0,01561	0,01115

λ_0 (Вб/м) и отношение λ_N/λ_0	Гармоники проводимости при форме паза:					
	со скруглениями		прямоугольном		овальном	
	Базовый вариант	Уменьшенная ширина зубцов	Базовый вариант	Уменьшенная ширина зубцов	Базовый вариант	Уменьшенная ширина зубцов
λ_4/λ_0	0,00529	0,004602	0,00528	4,90976E-03	0,00525	0,00458
λ_5/λ_0	0,00050	0,000244	0,00056	3,18496E-05	0,00050	0,00031
λ_6/λ_0	0,00158	0,001157	0,00159	1,30509E-03	0,00160	0,00116

3. Рассмотренные варианты форм паза не оказывают существенного влияния на гармонический состав МПВЗ. При скругленных углах пазов и уменьшенной на 25% ширине крайних зубцов полюса статора присутствие высших гармоник в кривой проводимости минимально.

Библиографический список

1. Computer Simulation of a Constant Velocity Contouring System Using x-y Surface Motor / L. Szabó [et al.] // Proceedings of the PCIM Conference, Nürnberg. 1995. Vol. Intelligent Motion. P. 375–384.

2. *Bertolini T.* The Calculation of Stepper-Motors Torque in Regard to the Geometry of the Stator and Rotor-Teeth // Proceedings of the International Conference on Electrical Machine. Pisa, 1988. P. 161–164.

3. Optimum Tooth Design for Linear Pulse Motor / Y. Takeda [et al.] // Conference Record of the 1989 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. P. 272–277.

4. Finite Element Method Magnetics: HomePage. URL: http://www.femm.info/wiki/HomePage/ (дата обращения: 15.11.2024).

5. *Хемминг Р. В.* Численные методы для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1972. 400 с.

6. ELCUT v.6.3. Комплекс программ для моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач. Руководство пользователя. СПб.: Производственный кооператив ТОР, 2015.

7. Sahoo N, Xu J, Panda S. Determination of current waveforms for torque ripple minimisation in switched reluctance motors using iterative learning: an investigation // IEE Proceedings Electric Power Applications. 1999;146(4):369. URL: https://sci-hub.ru/doi:10.1049/ip-epa:19990384

8. *Krishnan R.* Switched Reluctance Motor Drives // Modeling, Simulation, Analysis, Design And Applicationsotor Drives. 2001. URL: https://sci-hub.ru/doi: 10.1201/9781420041644.

9. *Мельников С. Ю.* Влияние неравномерности гребенчатой зубцовой зоны статора на электромагнитный момент гибридного шагового электродвигателя: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1994. 19 с.

УДК 621.311.1 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-277-281**

Н. Г. Семенова*
доктор педагогических наук, кандидат технических наук, профессор
**Оренбургский государственный университет*

НАХОЖДЕНИЕ ОТКЛЮЧИВШЕГОСЯ ОБОРУДОВАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В статье рассмотрена реализация четырех основных модулей: «База данных»; «Анализ топологии ЭС»; «Расчет установившихся режимов ЭС»; «Поиск отключившегося оборудования» автоматизированной системы «Нахождение отключившегося оборудования электрических сетей», позволяющей автоматизировать работу оперативно-диспетчерского персонала по обслуживанию электрических сетей. Представлены результаты тестирования разработанной автоматизированной системы.
Ключевые слова: *электрические сети, электрооборудование, граф электрической сети, автоматизированная система.*

N. G. Semenova*
Dr. Sc., Pedagogy, PhD, Tech., Professor
**Orenburg State University*

SEARCH FOR DISCONNECTED EQUIPMENT IN ELECTRICAL NETWORKS

The article discusses the implementation of four main modules: "Database"; "Analysis of the topology of the ES"; "Calculation of steady-state modes of the ES"; "Search for disconnected equipment" of the automated system "Finding disconnected equipment of electrical networks", which allows automating the work of operational dispatch personnel for maintenance of the ES. The results of testing the developed automated system are presented.
Keywords: *electrical networks, electrical equipment, graph of the electrical network, an automated system.*

Ключевым аспектом концепции цифровой трансформации электроэнергетики является автоматизация и интеллектуализация электроэнергетической инфраструктуры [1]. В связи с этим разработка программных ресурсов, позволяющих повысить эффективность деятельности оперативно-диспетчерского персонала по обслуживанию **электрических сетей** (ЭС), представляет важную и своевременную задачу.

Разработанная авторами автоматизированная система (АС), осуществляет расчет режимных параметров ЭС и анализ топологии с нахождением отключившегося электрооборудования. АС включает в себя четыре модуля: «База данных»; «Анализ топологии ЭС»; «Расчет установившихся режимов ЭС»; «Поиск отключившегося оборудования». Рассмотрим кратко реализацию каждого модуля.

I модуль: «База данных». В виду того, что распределительную сеть можно представить в виде совокупности множества объектов ЭС, в работе предложено разработать базу данных реляционного типа. Каждый объект ЭС (*сущность*) представляют в виде таблицы, в которой строка определяет номер элемента, входящего во множество объекта ЭС, а столбец – свойство объекта (*атрибут*). Такое табличное представление данных обеспечивает быстрый доступ и достаточно простое обращение к исходным данным – объектам ЭС.

Разработанная база данных состоит из семи сущностей – объектов ЭС, представленных в виде множеств: «Узлы» $Y = \{Y_1, Y_2, Y_3, \dots Y_n\}$; «Линии» $L = \{L_1,L_2,L_3, \dots L_n\}$; «Выключатели» $V = \{V_1,V_2,V_3, \dots V_n\}$; «Нагрузки» $Ng = \{Ng_1,Ng_2,Ng_3, \dots Ng_n\}$; «Силовые щиты» $Sh = \{Sh_1,Sh_2, \dots Sh_n\}$; «Трансформаторы» $Tr = \{Tr_1,Tr_2, \dots Tr_n\}$; «Внешняя сеть» $Vs = \{ Vs_1, Vs_2, \dots Vs_n\}$. Под *атрибутами* понимаем параметры и характеристики рассматриваемых объектов ЭС. Например, атрибуты сущности «Узлы» представлены в виде:

$Y_n = \{G_n, Z_n, N_n, U, U_{\max}, U_{\min}\}$, где G_n, – группа связанных объектов; Z_n – центр питания; N_n – номер узла; U – напряжение; $U_{\max}$ – максимальное напряжение узла; $U_{\min}$ – минимальное напряжение узла.

II модуль: «Анализ топологии электрической сети». В работе предложено в модуле «Анализ топологии ЭС» выделить два подмоду-

ля: «Автоматизированное формирование графа ЭС»; «Формирование кортежей для каждого узла ЭС». Рассмотрим реализацию каждого подмодуля.

«*Автоматизированное формирование графа ЭС*». Автоматизацию процесса формирования графа электрической сети в работе предложено осуществлять на основании адаптации одного из классических методов обхода графов – метода «Поиск в ширину», реализованного с помощью алгоритма BFS [2]. За основу данного алгоритма взяты атрибуты «номер узла, к которому подходит линия» и «номер узла, от которого отходит линия». Блок-схема адаптированного алгоритма BFS представлена на рис. 1.

Разработанный алгоритм позволяет сформировать граф исследуемой ЭС в виде совокупности связанных подграфов $PG = (Y_n, L_m)$, под которыми понимаем множество связанных объектов ЭС, подсоединенных к узлу Y_k. Такое разбиение исследуемой ЭС на подграфы позволяет не только достоверно определить подграф, в котором произошла авария, тем самым уменьшая объем вычислительной работы АС, но и обеспечить быструю и эффективную локализацию аварийных режимов ЭС [2].

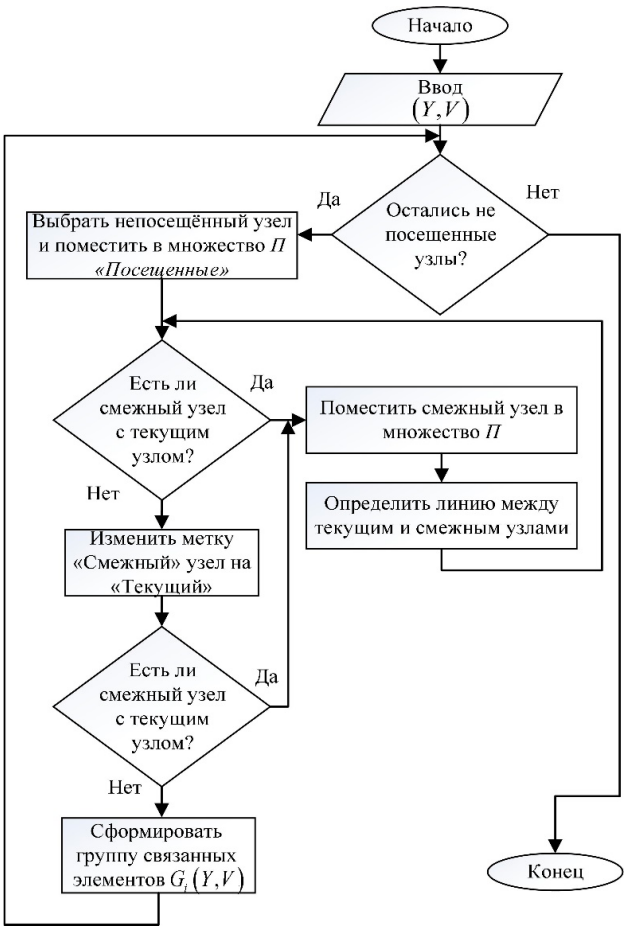


Рис. 1. Блок-схема алгоритма формирования ориентированного графа по атрибуту «номер узла»

«*Формирование кортежей Ra_n для каждого узла ЭС*». Формирование Ra_n осуществлено путем полного перебора элементов множеств исходных сущностей: *Y, L, V, Ng, Sh, Tr, Vs,* заданных в БД, по атрибуту «номер узла, к которому подсоединен объект ЭС» посредством их прямого произведения:

$$Ra = \{Ra_, Ra_2, \dots Ra_n\},$$

где $Ra_n = (y_n, l_n, v_n, ng_n, sh_n, tr_n, vs_n)$,

$$Ra_n = (y_n, l_n, v_n, ng_n, sh_n, tr_n, vs_n) \Big|$$
$$y_n \in Y \wedge l_n \in L \wedge v_n \in V \wedge ng_n \in Ng \wedge$$
$$sh_n \in Sh \wedge tr_n \in Tr \wedge vs_n \in Vs.$$

Длина кортежа Ra_n определяется количеством объектов ЭС, подходящих к узлу n.

Таким образом, топологию любой ЭС можно представить в виде совокупности кортежей Ra_n, составленных для каждого узла ЭС. Это позволит оперативно-диспетчерскому персоналу по обслуживанию ЭС мгновенно определить список оборудования, оказавшегося обесточенным в период ликвидации нарушений нормальной работы ЭС [2, 3].

III модуль: «Расчет режимов работы ЭС». В работе предложено проводить расчет режимных параметров ЭС классическим методом узловых напряжений в форме баланса мощностей, подробно изложенным в [4]. Общий вид уравнений:

$$U_i^2 Y_{ii} - \overset{*}{U}_i \sum_{j \neq 1} \dot{U}_j Y_{ij} + \dot{S}_i = 0,$$

где U_i – действующее значение напряжения i-го узла; $\dot{U}_j$ – комплексное значение напряжения j-го узла; Y_{ii} – собственная проводимость i-го узла; Y_{ij} – взаимная проводимость между i-м и j-м узлами; $\dot{S}_i$ – сопряженное значение комплексаа полной мощности нагрузки, потребляемой в i-м узле.

В результате этого расчета определяются: действующие и комплексные значения напряжений U_i во всех узлах исследуемой ЭС, токи в линиях U_i, потери активной и реактивной мощностей в линиях.

IV модуль: «Нахождение отключившегося оборудования». Данный модуль разработанной АС состоит из следующих операционных действий:

```
G = nx.Graph()
for bus, _ in net.bus.iterrows():
    G.add_node(bus)
for _, line in net.line.iterrows():
    from_bus = line.from_bus
    to_bus = line.to_bus
    G.add_edge(from_bus, to_bus)
pos = nx.spring_layout(G)
```

Рис. 2. Фрагмент кода модуля «Формирование графа ЭС»

1. Определение U_i и I_j, отличающихся от нормативных значений. Девиация рассчитанных U_i и I_j позволяет определить номера узлов и линий и включить их в список D «Девиация».

2. Поиск отключившегося оборудования.

2.1. Если $U_n = 0$, то автоматизированная система представит кортеж Ra_n, сформированный для узла n с перечнем электрооборудования, подсоединенного к этому узлу.

2.2. Для других улов, вошедших в список D «Девиация», в которых $U_n \neq 0$, формируется список «Нарушение», который будет использован в СППР по предотвращению и ликвидации технологических нарушений в распределительных сетях.

Разработанные модули автоматизированной системы программно реализованы на Python, с использованием библиотек «Pandapower», «Pandas», «Matplotlib» и «NetworkX» [4, 5]. Тестирование разработанной АС осуществлено для части ЭС 6/10кВ населенного пункта Оренбургской области, содержащей: 65 узлов; 58 нагрузки; 141 коммутационного аппарата; 282 выключателя; 4 источника внешней сети; 88 линий. Ниже представлены результаты реализации АС в соответствии с алгоритмом его использования [2].

1. Создание топологии исследуемой ЭС: формирование графа ЭС в виде групп связанных объектов; формирование кортежей электрооборудования, подсоединенных к каждому узлу ЭС, R_{an}.

На рис. 2 представлен фрагмент кода модуля «Формирование графа ЭС».

Результатом формирования графа части исследуемой ЭС является формирование двух подграфов (двух групп связанных объектов):

$$G_1 = (Y_1, Y_2, Y_3 \ldots Y_{26}, Y_{27}, Y_{28}; V_1, V_2, V_3 \ldots V_{38}, V_{39}, V_{40})$$

и

$$G_1 = \begin{pmatrix} Y_{201}, Y_{202}, Y_{203} \ldots Y_{226}, Y_{227}, Y_{228}; \\ V_{201}, V_{202}, V_{203} \ldots V_{238}, V_{239}, V_{240} \end{pmatrix}.$$

Фрагмент кода модуля «Формирование кортежей» представлен на рис. 3.

В результате получаем следующую совокупность кортежей объектов для узлов ЭС:

$$Ra_1 = (B_1, B_{53}, V_1, V_{27}, Exg_1),$$

$$Ra_3 = (B_4, B_5, B_9, B_{13}, B_{54}, V_2, V_3, V_5, V_7, V_{28}),$$

$$\ldots Ra_{56} = (B_{216}, B_{265}, V_{78}, V_{80}, L_{52}).$$

```
import pandapower as pp
net = pp.from_pickle("model_DP_3(BIG).p")

results = []
for node in net.bus.index:
    result_str = f"Ra{node} = ("
    connected_switches = net.switch[net.switch.bus == node]
    connected_loads = net.load[net.load.bus == node]
    connected_ext_grid = net.ext_grid[net.ext_grid.bus == node]
    if not connected_switches.empty:
        for idx, switch in connected_switches.iterrows():
            connected_line = net.line.loc[switch['element'], 'name']
            connected_trafo = net.trafo.loc[switch['element'], 'name'] if switch['element'] in net.trafo.index else None

            if connected_trafo:
                result_str += f"(Выключатель {idx}: линия {connected_line} и Трансформатор {connected_trafo}), "
            else:
                result_str += f"(Выключатель {idx}: линия {connected_line}), "
    if not connected_loads.empty:
        result_str += f"Подключенные нагрузки: {connected_loads.to_string(index=False)}, "
    if not connected_ext_grid.empty:
        result_str += f"Подключенные внешние источники: {connected_ext_grid.to_string(index=False)}, "
    result_str = result_str.rstrip(", ") + ")"
    results.append(result_str)
for result in results:
    print(result)
```

Рис. 3. Фрагмент кода модуля «Формирование кортежей»

Таблица 1

Фрагмент результатов расчета узловых напряжений для узлов, вошедших в первый подграф

Расчет узловых напряжений		
N	U_N, $кВ$	δ_N, °
1.	10,61	0,0
2.	10,60	0,0
3.	10,55	–1,1
…		
13.	0	0
14.	10,52	–3,2
15.	0	0
…		
27.	10,56	–1,2
28.	10,56	–1,1

2. Определение номера связанного подграфа ЭС, где произошла авария.

Используя сервер сбора и обработки данных мониторинга ЭС оперативный персонал, обслуживающий ЭС 6/10кВ населенного пункта Оренбургской области, обнаружил, что «сработал индикатор короткого замыкания в линии №17 от ТП-35 в сторону ТП-36».

3. Выявление номеров узлов n, в которых произошла авария, с использованием сформированного во II модуле связанного списка $PG = (Y_n, L_m)$. Эти узлы вошли в связанный список первого подграфа PG_1.

4. Расчет U_n в узлах, номера которых определены в пункте 3, по методу узловых напряжений в форме баланса мощностей.

Определение комплексных значений узловых напряжений (U_N , δ_N) и токов в линиях осуществлен только для узлов, вошедших в первый подграф PG_1. Полученные значения представлены в табл. 1.

5. Определение номеров узлов и линий, в которых произошло отклонение значений напряжения и токов от нормативных, формирование списка D – «Девиация».

Автоматизированная система определила, что в узлах под номерами 13 и 15 произошло отклонение напряжений от допустимых, так как $U_{13} = U_{15} = 0$, см. табл. 1.

6. Нахождение отключившегося электрооборудования по кортежам Ra_{13} и Ra_{15}, сформированным в пункте 1 представленного алгоритма.

Так как в узлах под №№ 13 и 15 произошло отклонение напряжений от нормативных значений, то на экране монитора были представлены два кортежа для узлов № 13 и № 15:

$$Ra_{13} = (V_{22}, V_{28}, V_{59}, L_{15}, L_{17}, L_{35}, Ng_{13});$$

$$Ra_{13} = (V_{24}, V_{61}, L_{17}, L_{36}, Ng_{14}).$$

Полученные кортежи определяют список отключившегося оборудования, а именно:

– к узлу под № 13 подходит следующее связанное электрооборудование: «выключатели нагрузки №№ 22; 28; 55, линии №№ 15; 17; 35, нагрузка № 13»;

– к узлу под № 15 подключено следующее электрооборудование: «выключатели нагрузки №№ 24; 61, линии №№ 17; 36, нагрузка № 14».

На рис. 4 показаны результаты работы разработанной АС «Поиск отключившегося электрооборудования». Отключенные узлы и линии части исследуемой ЭС выделены оранжевым цветом.

Тестирование разработанной АС на примере моделирования аварийного отключения показало следующее: оперативно-диспетчер-

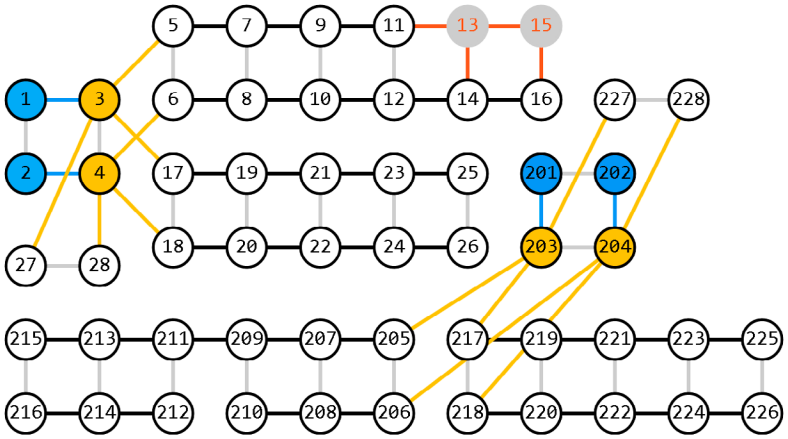


Рис. 4. Визуализация результатов работы разработанной АС

ский персонал по обслуживанию ЭС определял отключившееся электрооборудование в соответствии с должностной инструкцией в течение одной минуты, а разработанная АС показала результат в течение 7 с.

Выводы

1. Для повышения эффективности работы оперативно-диспетчерского персонала по обслуживанию распределительных сетей следует разрабатывать программные ресурсы, позволяющие повысить быстродействие поиска отключившегося электрооборудования в ЭС. Предложена структура автоматизированной системы, состоящая из четырех модулей: «База данных»; «Анализ топологии ЭС»; «Расчет установившихся режимов ЭС»; «Поиск отключившегося оборудования».

2. Разработанная автоматизированная система программно реализована на Python с применением библиотек «Pandapower», «Pandas», «Matplotlib» и «NetworkX». Тестирование АС показало достоверность полученных результатов и повышение быстродействия в процессе нахождения отключившегося электрооборудования.

Библиографический список

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 09 июня 2020 года №1523-р: Об энергетической стратегии РФ на период до 2035 год: URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810 (дата обращения: 16.12.2024).

2. *Семенова Н. Г., Дьяконов А. А.* Программный комплекс поиска отключившегося оборудования в электрической сети // Электротехнические системы и комплексы, 2024. № 2 (63). С. 50–59.

3. Свидетельство о регистрации прикладной программы «Анализ топологии электрической сети для различных режимов ее работы» / Семенова Н. Г., Дьяконов А. А; УФЭР. №1255; опубл. 26.03.2024.

4. *Идельчик В. И.* Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. Изд-во: URSS, 2022. 288 с.

УДК 004:620.9 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-282-286**

О. Я. Солёная*
кандидат технических наук, доцент
К. С. Никитина*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РАЗВИТИЕ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ В РОССИИ

Цифровая трансформация энергетической отрасли России – ключевой фактор повышения ее эффективности, устойчивости и безопасности. Согласно стратегии развития энергетики до 2035 г. одним из основных направлений трансформации является внедрение технологий Smart Grid на электроэнергетических объектах. В статье проведен анализ текущего статуса и перспективы развития интеллектуальных энергосетей, включая цифровые подстанции, виртуальные электростанции, протоколы связи и региональные проекты. Обсуждаются ключевые вызовы и потенциальные эффекты внедрения цифровых технологий, а также дается анализ по регионам.
Ключевые слова: *цифровизация, электроэнергетика, Smart Grid, цифровые подстанции, объединенное диспетчерское управление, возобновляемые источники энергии.*

O. Ya. Solenaya*
PhD, Tech., Associate Professor
K. S. Nikitina*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DEVELOPMENT OF DIGITALIZATION OF THE ENERGY SECTOR IN RUSSIA

Digital transformation of the Russian energy industry is a key factor in increasing its efficiency, sustainability and safety. According to the energy development strategy until 2035, one of the main directions of transformation is the introduction of Smart Grid technologies at electric power facilities. The article analyzes the current status and prospects for the development of smart energy networks, including digital substations, virtual power plants, communication protocols and regional projects. The key challenges and potential effects of introducing digital technologies are discussed, and analysis is provided by region.
Keywords: *digitalization, electric power industry, Smart Grid, digital substations, Unified Dispatch Control, renewable energy sources.*

Цифровизация энергетической отрасли Российской Федерации стала приоритетной задачей в рамках государственной стратегии развития до 2030 г. Программа «Цифровая трансформация 2030» направлена на повышение надежности и доступности энергоснабжения путем внедрения инновационных технологий, таких как интеллектуальные сети (Smart Grid), цифровые подстанции и системы управления на основе больших данных [1].

Основными целями цифровой трансформации являются:

1. Повышение энергетической эффективности и сокращение потерь;

2. Обеспечение устойчивости энергетической системы;

3. Развитие новых форм взаимодействия с потребителями;

4. Создание платформы для интеграции возобновляемых источников энергии.

Концепция Smart Grid в России представляет собой интеграцию интеллектуальных технологий в существующую энергосеть для обеспечения ее адаптивности, надежности и эффективности [2]. Эта концепция основывается на внедрении автоматизированных систем учета, управления и анализа данных, а также на использовании современных стандартов и протоколов связи, таких как IEC 61850 и TASE.2 [3].

Основными принципами Smart Grid являются интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ), автоматизация процессов управления энергосетями, прогнозирование и оптимизация нагрузок с использованием больших данных [4], устойчивость к сбоям и быстрый возврат к нормальной работе.

Smart Grid дает возможность оперативно реагировать на изменения спроса и предложения, что особенно важно для регионов с высокой долей ВИЭ или сложными климатическими условиями. Внедрение Smart Grid в России сопровождается разработкой и адаптацией нормативной документации, включающей ГОСТ Р 55768-2013 и ГОСТ Р 54418-2011. Эти стандарты регламентируют использование интеллектуальных систем мониторинга и автоматизации в энергосетях [6].

Рассмотрим существующие технологии Smart Grid в России.

Цифровые подстанции являются ключевым элементом Smart Grid. Они включают в себя интеллектуальные устройства мониторинга, управления и защиты, которые интегрированы в единую систему автоматизированного управления [3]. В России наиболее распространены цифровые подстанции, использующие протокол IEC 61850 для унификации данных и управления [3].

Преимуществами цифровых подстанций можно обозначить:

1. Улучшенную надежность (интеграция интеллектуальных систем мониторинга позволяет заранее выявлять неисправности и предотвращать аварии [5]);

2. Снижение эксплуатационных затрат (использование протоколов IEC 61850 позволяет унифицировать оборудование и снизить затраты на его обслуживание [5]);

3. Ускорение операций (возможность дистанционного управления ускоряет процесс восстановления электроснабжения в случае сбоев [5]);

4. Поддержку устойчивого развития (интеграция с возобновляемыми источниками энергии улучшает энергетический баланс [5]).

Примеры реализованных проектов:

1. Подстанция «Береговая» в Краснодаре. Этот объект был введен в эксплуатацию в 2020 г. и стал примером первой цифровой подстанции в регионе. Она оснащена системой автоматического управления нагрузкой, интегрирована с ВИЭ, включая солнечные и ветровые станции. Подстанция использует протокол IEC 61850, что обеспечивает бесшовное взаимодействие устройств [3].

2. Подстанция «Северная» в Калининградской области. Проект ориентирован на решение задач по снижению потерь электроэнергии. Она интегрирована с системой автоматического мониторинга, что позволяет оперативно реагировать на изменения в сети. Кроме того, объект оснащен интеллектуальными системами диагностики, обеспечивающими предиктивное обслуживание [3].

3. Цифровые объекты в Московской области и на Сахалине. В Московской области внедрены системы автоматического управления распределительными сетями, что позволило снизить число аварий на 30%. На Сахалине реализован проект виртуальной электростанции, который обеспечивает надежное энергоснабжение отдаленных населенных пунктов, используя распределенную генерацию и аккумуляторы [5].

Существуют виртуальные электростанции (Virtual Power Plants, VPP), которые представляют собой распределенные системы генерации, включающие малую генерацию, аккумуляторы и ВИЭ. Первая VPP в России была создана в Санкт-Петербурге в 2021 г. в рамках пилотного проекта ПАО «Россети», демонстрируя возможности объединения распределенных ресурсов в единую систему [5].

Преимущества виртуальных электростанций:

1. Оптимизация энергопотребления (VPP позволяет сбалансировать генерацию и потребление, снижая нагрузку на сеть).

2. Интеграция ВИЭ (увеличение доли возобновляемых источников энергии в энергобалансе).

3. Гибкость управления (возможность быстрого реагирования на изменения спроса и предложения).

4. Снижение затрат (уменьшение необходимости строительства крупных централизованных электростанций).

Важнейшими инструментами цифровизации в России являются технологии больших данных, интернета вещей, искусственного интеллекта и блокчейна. Эти технологии используются для анализа энергопотребления, прогнозирования нагрузок и повышения эффективности управления.

Системы сбора данных (Asterisk Manager Interface – AMI) объединяют интеллектуальные счетчики, датчики и контроллеры, что позволяет формировать точные профили энергопотребления для каждого потребителя [4]. Эти данные анализируются с помощью технологий больших данных (Big Data), что улучшает качество прогнозирования и оптимизирует распределение энергии [4].

Для обеспечения надежной работы энергетических систем используются современные протоколы связи. Протокол IEC 61850 стал основным стандартом для цифровых подстанций. Он обеспечивает бесшовное взаимодействие

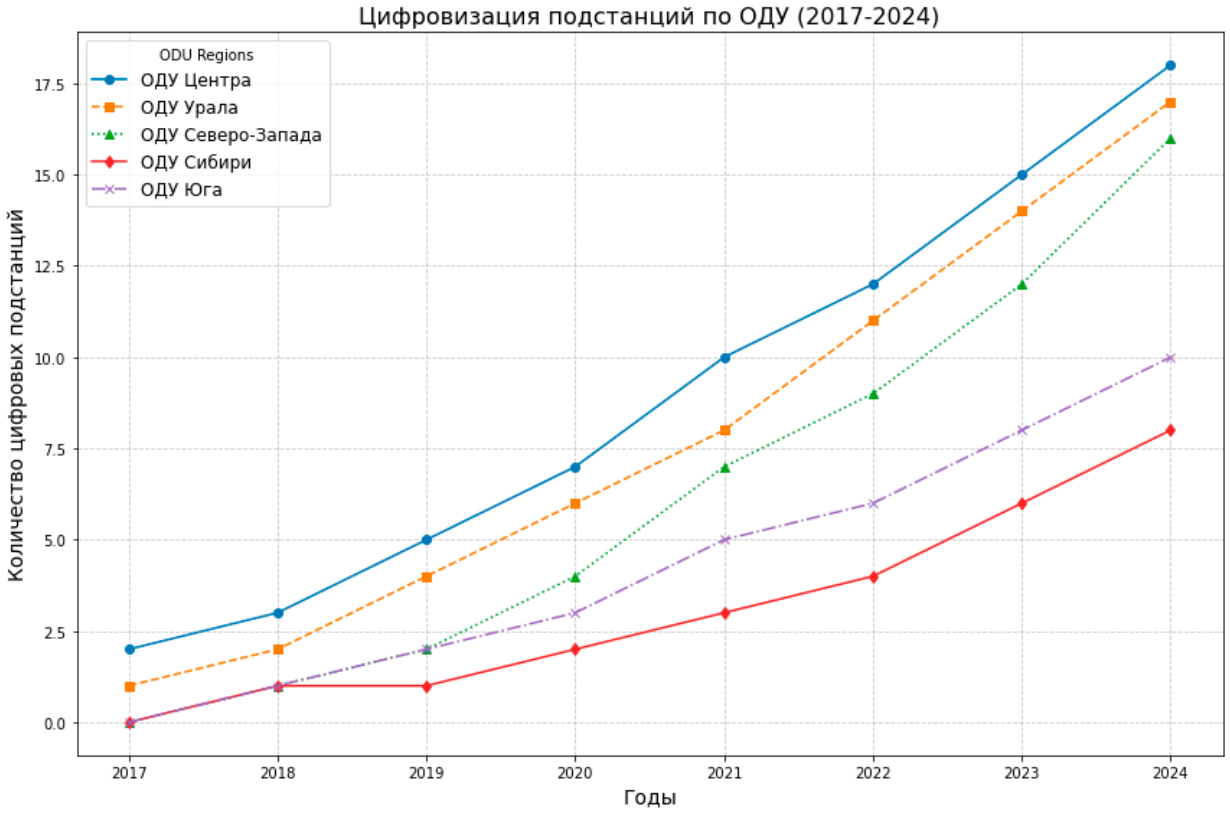


Рис. 1. Цифровизация подстанций по ОДУ

между различными устройствами [2]. Технологии LPWAN, такие как LoRaWAN и NB-IoT, используются для обмена данными между датчиками в удаленных и труднодоступных районах [2]. Протокол TASE.2 (ICCP) применяется для передачи данных между диспетчерскими центрами [3].

В 2024 г. проекты цифровизации активно развиваются в различных регионах России, внедрение которых активно развивает компания «Россети» и другие энергетические компании. В марте 2024 г. в Санкт-Петербурге открылась интеллектуальная лаборатория цифровых сетей. Для лаборатории был создан комплекс моделирования энергосистем в режиме реального времени, содержащий 35 тысяч узлов и являющийся самым мощным в России и превосходящим многие зарубежные аналоги по своим показателям. В лаборатории находится испытательная сеть 0,4–35 кВ для тестирования традиционного и цифрового оборудования. Впервые в России применен четырехквадрантный усилитель большой мощности (120 кВА), позволяющий имитировать подключение к энергосистеме потребителя или объекта генерации, включая ВИЭ.

По регионам России введены в эксплуатацию цифровые подстанции:

1. Подстанция «Ангарская» (Краснодарский край, ОДУ Юг) – мощность 50 МВА, обеспечивает надежное электроснабжение города Краснодара и его северо-восточной части.

2. Подстанция «Балатон» (Вологодская область, ОДУ Северо-Запад) – мощность 35 кВ, снабжает энергией компрессорные станции.

3. Подстанция «Ясень» (Ленинградская область, ОДУ Северо-Запад) – мощность 110 кВ, связана с развитием газовой инфраструктуры.

4. Подстанция «Ореховская» (ХМАО, ОДУ Урал) – мощность 32 МВА, после модернизации увеличила свою производительность вдвое.

5. Подстанция «Михали» (Калужская область, ОДУ Центр) – новая цифровая подстанция мощностью 110 кВ для промышленных объектов.

6. Подстанции «Выездное» и «Монтажная» (Нижегородская область, ОДУ Центр) – модернизированы для повышения надежности электроснабжения.

Цифровизация подстанций включает в себя автоматизацию управления, использование микропроцессорных устройств и интеграцию

Таблица 1

Анализ показателей надежности FMEA

Идентификатор элемента системы	Возможный отказ	Причина отказа	Последствия отказа	S	O	D	RPN	Рекомендуемые меры
Интеллектуальные счетчики (AMI)	Ошибка в передаче данных	Сбой программного обеспечения	Нарушение	6	4	3	72	Регулярное обновление ПО, резервирование данных
Диспетчерское управление и сбор данных (SCADA)	Потеря связи с подстанциями	Проблемы с сетевой связью	Увеличение времени реакции	9	5	4	180	Дублирование каналов связи, улучшение защиты данных
Хранилища энергии	Отказ аккумулятора	Износ батареи	Нарушение компенсации пиковых нагрузок	7	3	6	126	Плановое обслуживание и мониторинг состояния аккумуляторов
Управление спросом (DR)	Неправильная регулировка нагрузки	Ошибка алгоритма	Перегрузка сети	8	3	5	120	Улучшение алгоритмов прогнозирования, тестирование перед внедрением
Линии электропередачи	Повреждение линии	Непогода, износ оборудования	Отключение потребителей	10	7	4	280	Укрепление линий, замена воздушных на кабельные в критических зонах

в цифровую энергетическую инфраструктуру. Такие объекты существенно повышают надежность энергосистем и адаптируют их под современные нужды.

Представим данные по развитию цифровизации подстанций в регионах России с 2017 по 2024 г. (рис. 1).

Проведем анализ элементов цифровой системы подстанции 110/10 кВ «Ангарская», расположенной в Краснодарском крае на основе метода анализа надежности FMEA (анализ режимов отказов и последствий) [6].

По формуле

$$RPN = D \cdot O \cdot S,$$

где D – вероятность обнаружения проблемы до отказа, O – вероятность возникновения, S – серьезность последствий.

Каждая составляющая формулы принимает значение от 1 до 10. На основе статистических данных, взятых у «Россети Кубань» [7] и данных министерства энергетики (табл. 1), проведем анализ показателей надежности и составим рекомендации по их нормализации [8].

Несмотря на успехи цифровизации, существуют значительные барьеры. Во-первых, высокая стоимость внедрения технологий Smart Grid остается серьезной проблемой [2]. Это особенно остро ощущается в регионах с ограниченным бюджетом [2]. Во-вторых, растущие киберугрозы требуют внедрения более сложных систем защиты, что увеличивает расходы [3]. Еще одной проблемой является недостаток нормативно-правового регулирования, которое пока не учитывает все особенности цифровой энергетики [9, 10].

Потенциальные выгоды от цифровизации огромны. Внедрение технологий Smart Grid может снизить потери электроэнергии до 20%, что приведет к экономии ресурсов и средств [3]. Также увеличится доля возобновляемых источников энергии в энергобалансе, что соответствует целям устойчивого развития [4]. Для потребителей цифровизация создает новые услуги, такие как управление нагрузкой и гибкие тарифы, что улучшает качество обслуживания и делает его более персонализированным [5].

Цифровизация энергетики России – необходимое условие для повышения ее конкурентоспособности и устойчивости. Реализация программ Smart Grid и развитие технологий, таких как цифровые подстанции и виртуальные электростанции, позволит не только решить текущие проблемы, но и создать основу для устойчивого роста отрасли в будущем.

Библиографический список

1. *Костров Д.* «Умные сети электроснабжения» (Smart Grid) и проблемы с кибербезопасностью // Информационная безопасность. URL: http://www.itsec.ru/articles2/in-ch-sec/umnye-seti-elektrosnabzheniya-smart-grid-i-problemy-s-kiberbezopasnostyu (дата обращения: 12.12.2024).

2. *Гаврилович Е. В., Данилов Д. И., Шевченко Д. Ю.* «Умные сети» Smart Grid – перспективное будущее энергетической отрасли России // Молодой

ученый. 2016. № 28.2 (132.2). С. 55–59. URL: https://moluch.ru/archive/132/36972/ (дата обращения: 12.12.2024).

3. Необходимая и достаточная информация о построении и связях «цифровых» сетей для неспециалиста. URL: https://www.elec.ru/publications/peredacha-raspredelenie-i-nakoplenie-elektroenergi/7270/ (дата обращения: 12.12.2024).

4. Энерджинет. URL: https://energynet.ru. (дата обращения: 12.12.2024).

5. ПАО «Россети» URL: https://www.rosseti.ru. (дата обращения: 12.12.2024).

6. ГОСТ Р 51901.12 2007. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов.

7. ПАО «Россети Кубань». URL: https://rosseti-kuban.ru/ (дата обращения: 12.12.2024).

8. Министерство энергетики РФ. URL: https://minenergo.gov.ru/ (дата обращения: 12.12.2024).

9. ГОСТ Р 55768-2013. Информационная технология. Модель открытой Грид-системы. Основные положения.

10. ГОСТ Р 54531-2011. Нетрадиционные технологии. Возобновляемые и альтернативные источники энергии.

УДК 621.315.1.052.22 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-287-292**

***С. В. Солёный** **
кандидат технических наук, доцент
В. О. Иванов*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОСОБЕННОСТИ ДЕФЕКТОВ ИЗОЛЯТОРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Рассмотрены виды дефектов полимерных, стеклянных, фарфоровых изоляторов воздушных линий электропередач, оценены негативные последствия дефектов изоляторов, представлены условия для минимизации дефектов изоляторов воздушных линий электропередач.
***Ключевые слова:** полимерные, стеклянные, фарфоровые изоляторы, дефекты изоляторов, коррозия, дендриты.*

S. V. Solyonyj*
PhD, Tech., Associate Professor
V. O. Ivanov*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

FEATURES OF DEFECTS IN OVERHEAD POWER LINE INSULATORS

The types of defects in polymer, glass, and porcelain insulators of overhead power lines are considered, the negative consequences of insulator defects are estimated, and conditions for minimizing defects in overhead line insulators are presented.
***Keywords:** polymer, glass, porcelain insulators, insulator defects, corrosion, dendrites.*

Воздушные линии электропередачи (ВЛЭП) – комплекс элементов энергетической сети, передающий и распределяющий электроэнергию посредством электрического тока. Элементами ВЛЭП являются провода, опоры, грозозащитные троса, заземление, разрядники и, конечно же, изоляторы. Изоляторы воздушных линий электропередачи являются основными компонентами, входящими в структуру ВЛЭП. Из-за их неработоспособности случается больше всего энергетических аварий, приводящие к различным последствиям, в том числе и угрожающим жизни населения. Изоляторы ЛЭП отказывают по следующим причинам: климатические условия – 22%, дефекты конструкции, изготовления и монтажа – 9%, старение материалов – 3%, недостатки эксплуатации – 5%, недостатки проектирования и производства– 12%, механические повреждения –17%, загрязнение – 16%, электрические перегрузки – 8%, коррозия – 4%, недостаток технического обслуживания (мониторинг) – 4% (рис. 1) [1–3].

Рис. 1. Причины отказа изоляторов ВЛЭП

Дефекты изоляторов линий электропередач могут привести к различным негативным последствиям, включая [4]:

– снижение надежности системы (дефекты могут привести к сбоям в работе электросетей, что может вызвать отключения электроэнергии и нарушить поставки для потребителей);

Рис. 2. Дефекты полимерных изоляторов: дендриты и треки, образование сквозных отверстий [5]

– пробои изоляции (поврежденные изоляторы могут не справляться с высокими электрическими полями, что может привести к пробоям и коротким замыканиям);

– увеличение потерь энергии (неэффективные изоляторы могут увеличивать потери энергии в виде тепла, что снижает общую эффективность системы);

– повышенные эксплуатационные расходы (необходимость частого ремонта или замены дефектных изоляторов может привести к увеличению затрат на обслуживание и эксплуатацию;

– риск аварий (дефекты могут привести к аварийным ситуациям, включая возгорания или выбросы опасных веществ, что может угрожать безопасности людей и окружающей среды);

– снижение срока службы оборудования (неправильная работа изоляторов может привести к ускоренному износу других компонентов системы, что в конечном итоге сократит срок службы всего оборудования);

– экологические последствия (аварии и сбои в работе электросетей могут привести к выбросам загрязняющих веществ и негативному воздействию на экосистемы;

– репутационные риски (для энергетических компаний дефекты изоляторов и связанные с ними сбои могут негативно сказаться на репутации и доверии со стороны потребителей.

Таким образом, последствия от неработоспособных изоляторов могут быть разными, поэтому для минимизации этих последствий важно проводить регулярное техническое обслуживание, диагностику и мониторинг состояния изоляторов, а также применять современные технологии и материалы для повышения их надежности.

В настоящее время исследователи занимаются поиском методов оценки работоспособности изоляторов, поэтому в технической литературе часто встречается информация о методах обследования изоляторов. Но, прежде всего, необходимо оценить их дефекты, которые могут встретиться. Поэтому тема исследования актуальна.

Целью исследования являлся анализ дефектов изоляторов воздушных линий электропередачи. В рамках поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– оценить дефекты, встречающиеся у полимерных, фарфоровых и стеклянных изоляторов ВЛЭП;

– рассмотреть особенности дефектов, встречающиеся либо у полимерных, либо у фарфоровых, либо у стеклянных изоляторов ВЛЭП;

– изучить меры по минимизации дефектов изоляторов ВЛЭП.

На ВЛЭП применяются полимерные, стеклянные и фарфоровые изоляторы. У каждого вида есть свои дефекты. Данное исследование и будет посвящено оценке дефектов изоляторов и причин их появления.

Рассмотрим полимерные изоляторы. Дефекты полимерных изоляторов линий электропередач могут возникать по разным причинам и могут существенно влиять на их эксплуатационные характеристики и надежность. Основными являются дендриты, трещины, микротрещины, сколы. Дендриты – это продольные трещины на корпусе полимерного изоляторов. Возникают из-за проникновения влаги под наружный слой, в результате чего растрескивается его основание (рис. 2) [5].

Дендриты и треки приводят к образованию сквозных отверстий. Причиной могут являться дефекты конструкции (наличие воздушных включений на границе раздела «стержень – оболочка» (рис. 3) [6].

Одними из основных повреждений изоляторов являются сколы и трещины. Данные дефекты появляются по различным причинам (рис. 4) [5]:

– перепады температур окружающей среды, в результате происходит термическое расширение или сжатие изоляционного материала;

-внешние механические нагрузки, такие как ветер, и особенно опасен лед, образующийся на изоляторах;

– механические воздействия, которые возникают в процессе установки, монтажа или эксплуатации изоляторов;

– химические вещества из атмосферы, которые оседают на изоляторах и загрязняют их, приводят к коррозии;

Рис. 3. Образование треков полимерных изоляторов [6]

– электрические перегрузки, результатом которых будут пробои изоляторов;

– некачественные изоляционные материалы и естественный износ материалов.

Если вблизи ВЛЭП находятся высокие деревья, то могут возникнуть повреждения изоляторов из-за падения веток.

К дефектам полимерных изоляторов относится их деформация. К этой деформации приводят неправильная установка изоляторов, колебания температур. Если температура повышается, то возможно изменение геометрии нарушение контактов. Если температура снижается, то изоляционный материал может сжиматься, в результате чего изменяется форма и размеры, появляются трещины. Деформация может возникнуть и при влиянии внешних признаков – ветер, ледяные «наросты». Лед увеличивает вес гирлянд изоляторов, и они деформируются. Таким образом, деформация отрицательно сказывается на работоспособности изоляторов, поэтому необходимо постоянно осуществлять мониторинг их состояния и вовремя принимать меры по ликвидации дефектов и неисправностей.

Одним из серьезных дефектов изоляторов являются электрические пробои (рис. 5). Они возникают по причине загрязнения изоляторов, из-за высоких электрических полей. Пробои часто приводят к серьезным последствиям, вплоть до угрозы жизни населения из-за короткого замыкания в сети и даже пожаров и возгораний. Если пробои достаточно часто возникают, то следствием будет досрочный износ изоляционного оборудования, сокращение срока службы. А это приведет к дополнительным расходам на эксплуатацию, на приобретение новых изоляторов. А, следовательно, повышение стоимости электроэнергии.

Кроме того, аварии, вызванные пробоями, отрицательно влияют на окружающую среду, а именно могут привести к выбросам загрязняющих веществ, тем самым ухудшим экологию. Увеличение потерь энергии в виде тепла также будет следствием возникновения пробоя изоляторов, а значит общая эффективность работы ЛЭП будет снижена [7].

Рис. 4. Дефекты полимерных изоляторов: трещины и сколы [5]

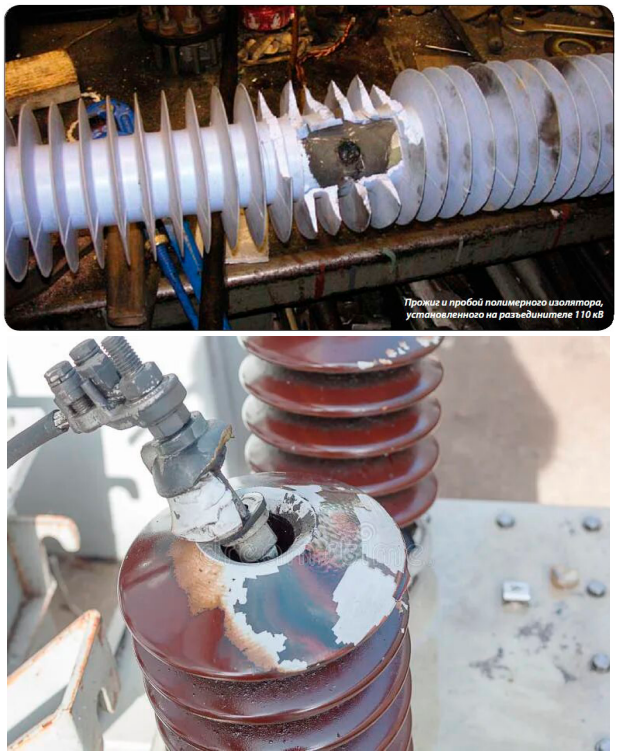


Рис. 5. Прожиг и пробой полимерного изолятора

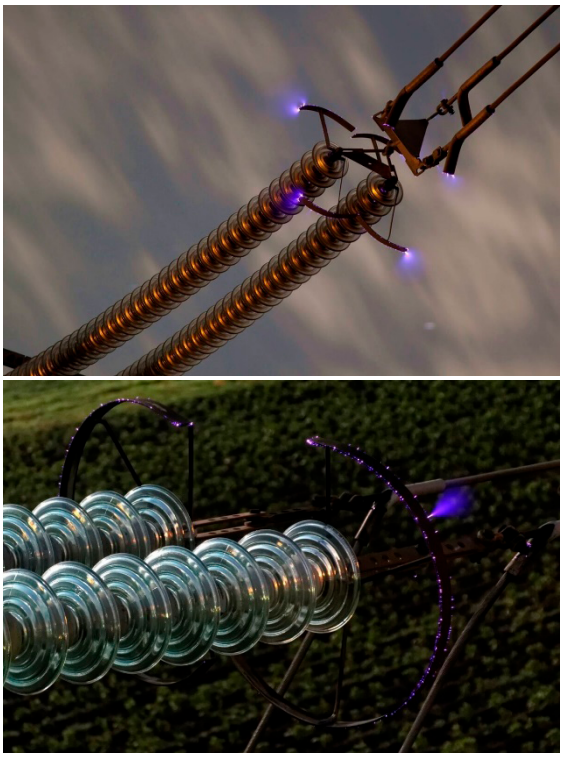


Рис. 6. Коронный разряд изолятора ВЛЭП

Помимо электрических дефектов существую химические, физические, температурные. Химические заключаются в разложении материала под воздействием ультрафиолетового излучения, озона, агрессивных химических веществ. К таим веществам относятся серная и соляная кислота, щелочи. Они вызывают коррозию. В условиях высокой влажности могут образовывать коррозионные продукты на металлических частях ЛЭП и ухудшать изоляционные свойства. Также отрицательно влияют органические растворители (ацетон, бензин, толуол), особенно на полимерные изоляторы. Промышленные выбросы (диоксиды серы, азота) могут образовывать кислоты в присутствии влаги, что тоже приводит к коррозии и деградации изоляционных материалов. В прибрежных зонах морская соль может оседать на изоляторах, а агрессивные газы (аммиак), образующиеся в результате сельскохозяйственной деятельности и химикаты (гербициды и пестициды), используемые для обработки территорий, также негативно влияют на состояние изоляции.

Среди физических дефектов основными являются влага и конденсат, накапливающийся на поверхности изоляторов, пыль, грязь, соль приводят к снижению электрической прочности изолятора. Полимерные изоляторы особо страдают от избыточной влаги и загрязнений. Наличие таких дефектов нередко приводит к возникновению атмосферного (**коронного разряда**)**.** В результате происходят дополнительные потери электроэнергии. Постоянное воздействие влаги снижает электрическую прочность изоляции и приводит к пробоям (рис. 6).

Еще одним дефектом является **хрупкость** изоляторов (рис. 6). Частые изменения температуры вызывают термическое расширение или сжатие материалов, из которых они изготовлены. Как результат – появление трещин и микротрещин. При высоких температурах полимерные изоляторы теряют свои механические свойства, происходит их **деформация.** Поэтому необходимо стараться не допускать перегрева изоляторов, т. е не допускать их перегрузок. При низких температурах материалы становятся более хрупкими. Полимеры могут терять эластичность. А это приводит к разрушению материала при ударах или других механических нагрузках. Кроме того, на изоляторы оказывают влияние давление от льда и снега, правда это в основном касается арктических регионов. Поэтому в таких регионах необходимо использовать изоляторы, изготовленные из морозоустойчивых материалов, которые менее хрупкими являются. К таким изоляторам относятся современные полимерные и керамические изоляторы [7].

Рис. 7. «Хрупкий» излом изолятора и его деформация [6, 7]

Хрупкий излом возникал в результате разрушения стеклопластикового сердечника под действием кислот, которые появлялись при частичных разрядах в изоляторе из-за влаги. Была нарушена герметичность (рис. 7). Защитить изоляторы от суровых погодных условий может и использование теплоизоляционных покрытий или оболочек, они сохранят тепло и, тем самым, предотвратят образование льда и снега на их поверхности. А также нанесение специальных антиобледенительных составов на изоляторы поможет справиться с морозами, льдом и снегом. Чтобы гирлянды изоляторов не ломались при налипании снега и льда, можно ставить дополнительные опоры под них.

В процессе сборки изолятора могут возникнуть скрытые повреждения, который в дальнейшем будет влиять на работоспособность изоляторов, а, следовательно, и всей ВЛЭП в целом. На рисунке 5 представлено исключение возможности неконтролируемого повреждения стеклопластикового стержня при опрессовании оконцевателей в процессе сборки изолятора. (рис. 8) [7].

Если анализировать фарфоровые изоляторы, то при определенных условиях у них тоже могут появляться трещины, микротрещины, коррозия, загрязнение, деформация, избыточное увлажнение. Но уделим внимание дополнительным дефектам, которые могут встречаться при нарушении работоспособности изоляторов. К таким дефектам относятся **пористость, отслоение эмали.** Эмалью покрываются фарфоровые изоляторы. Эта эмаль может отслаиваться в результате действия избыточной влаги, температурных изменений или механических повреждений. Пористые участки в изоляционных материалах приводят к ухудшению их механических и электрических свойств и к повышению восприимчивости к влаге и загрязнениям. Насчет коррозии тоже следует сказать отдельно. Фарфор сам по себе не корродирует, но металлические элементы (крепежные детали) могут подвергаться коррозии, а, следовательно, ослабляется конструкция изолятора. Фарфоровые изоляторы часто получают повреждения при транспортировке к месту назначения или при установке в силу

Рис. 8. Скрытые повреждения изоляторов в процессе сборки [6]

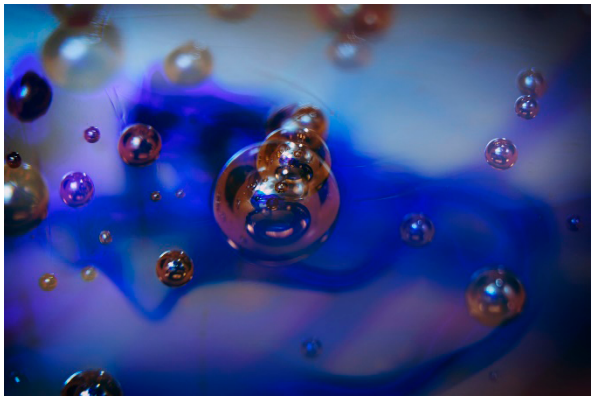


Рис. 9. Пузырьки воздуха в стеклянном изоляторе

свойств материала, из которого они изготовлены [8].

У стеклянных изоляторов вышеперечисленные дефекты могут возникать в той или иной мере, но есть еще дефект, который присущ только этим видам изоляторов. Это пороки стекла. Пороки подразделяются на стекловидные включения, газовые включения, твердые включения. В процессе производства изоляторов могут возникать дефекты в самом стекле (пузырьки воздуха, включения или неоднородности) (рис. 9). Они ослабляют механическую прочность и электрические характеристики изолятора [9].

В заключение отметим, что для предотвращения и минимизации дефектов изоляторов воздушных линий электропередач необходимо осуществлять их постоянный мониторинг, техническое обслуживание, использовать качественный материалы для их производства. Также следует осуществлять постоянный контроль качества изоляторов на все этапах производства, включая тестирование на прочность, диэлектрические свойства. Фарфоровым изоляторам следует обеспечить правильные условия обжарки, чтобы избежать внутренних напряжений и дефектов. При выборке и установке изоляторов необходимо учитывать климатические условия региона, при необходимости использовать защитные покрытия для повышения устойчивости к внешним воздействиям. Желательно очищать изоляторы от загрязнений, особенно в условиях высокой влажности, чтобы избежать ухудшения их электрических свойств (хотя постоянно делать это достаточно проблематично на ВЛЭП). Опираясь на вышеизложенное, необходимо разрабатывать методы и способы уменьшения возникновения дефектов изоляторов для продления их срока службы.

Библиографический список

1. Повреждаемость изоляторов ВЛ. URL: https://energo-mpei.ru/tpost/ah3nmn8t61-povrezhdaemost-izolyatorov-vl (дата обращения: 03.12.2024).

2. *Иванов Д. А.* Перспективы бесконтактного неразрушающего контроля высоковольтного оборудования подстанций с помощью акустических методов. URL: http://tef.tatar/assets/gallery/109/3237.pdf (дата обращения: 03.12.2024).

3. *Давыдкин С. М., Жуков Б. М.* Повышение стойкости изоляторов ВЛ к воздействию вибрации. URL: https://np-esi.ru/wp-content/uploads/2020/07/Повышение-стойкости-полимерных-изоляторов-к-воздействию-вибрации.pdf (дата обращения: 03.12.2024).

4. О безопасном методе испытания изоляторов высоковольтных ЛЭП под напряжением. URL: https://eepir.ru/new/o-bezopasnom-metode-ispytaniya-izolyatorov-vysokovolytnyh-lep-pod-napryagheniem-na-vystavke-elektricheskie-seti-rossii-2016/ (дата обращения: 04.12.2024).

5. Повреждения полимерных изоляторов и их диагностика в эксплуатации. URL: https://изоляторыполимерные.рф/o-produktsii/ispytaniya/povrezhdeniya-polimernykh-izolyatorov-i-ikh-diagnostika-v-ekspluatatsii/ (дата обращения: 03.12.2024).

6. Полимерные изоляционные конструкции для ВЛ. Преимущество и недостатки, опыт эксплуатации. Перспективы применения. URL: https://np-esi.ru/wp-content/uploads/2022/11/5.-Деев-Андрей-Валерьевич.pdf (дата обращения: 04.12.2024).

7. Ассоциация «Электросетьизоляция». Применение полимерной изоляции в современном линейном строительстве // Энергоэксперт. 2024. № 1. С. 4–8.

8. Диагностирование состояния фарфоровых изоляторов и покрышек виброакустическим методов под рабочим напряжением. URL: https://ntc-eds.ru/основные-виды-деятельности/диагностирование-состояния-фарфоров/ (дата обращения: 05.12.2024).

9. *Поплавский А., Салов О.* Пути повышения надежности и эффективности ЛЭП. URL: https://www.eprussia.ru/epr/350/7841116.htm (дата обращения: 05.12.2024).

УДК 621.311 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-293-296**

О. Б. Чернышева*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОЦЕНКА ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИЛИВНЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ

Рассмотрены основные принципы функционирования приливных электростанций. Проведен анализ географических мест, пригодных для развития приливной энергетики. Выполнен расчет возможного энергетического потенциала Пенжинской приливной электростанции.
Ключевые слова: *электроэнергетика, распределенная генерация, приливы, отливы, электроэнергия, приливные электростанции.*

O. B. Chernysheva*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ASSESSMENT OF ELECTRICITY GENERATION BY TIDAL POWER PLANTS

The basic principles of operation of tidal power plants are considered. An analysis of geographical locations suitable for the development of tidal energy was carried out. A calculation of the possible energy potential of the Penzhin tidal power station has been carried out.
Keywords: *electric power industry, distributed generation, tides, electric power, tidal power plants.*

В последние годы в мире наблюдается повышенный интерес к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), гарантирующих минимальный выброс углеродного следа в окружающую среду. Доля установленной мощности ВИЭ на конец 2022 г. в Китае составляла 45%, в США – 31,5%, в России – 2,3%, причем здесь учтена суммарная генерация электроэнергии солнечными, ветровыми, геотермальными, волновыми и приливными электростанциями [1]. Эти данные представляют реальную картину развития ВИЭ в стране.

В России традиционно большое внимание уделяется таким источникам энергии, как нефть, газ и уголь, что в конечном итоге приводит к недостаточному финансированию и поддержке проектов в области возобновляемой энергетики и, в частности, приливной энергетики (ПЭ). Россия обладает уникальными природными условиями для развития этого электроэнергетического сектора, особенно в таких регионах, как Дальний Восток, районы Каспийского моря, остров Сахалин, регион вокруг Кольского полуострова и Баренцева моря. Теоретический потенциал приливных электростанций (ПЭС) оценивается в 150–200 ГВт мощности со среднегодовой выработкой электроэнергии порядка 250 млрд кВт·ч. Большие амплитуды приливов и отливов создают благоприятные условия для эффективного использования этого вида энергии, особенно, в Мезенском и Тугурском заливах, в Пенжинской губе.

Для строительства ПЭС идеально подходят узкие заливы, глубоко впадающие в сушу, при разнице уровней воды при приливе и отливе не менее 5 м. Во внутренних морях приливы практически отсутствуют, что делает их не пригодными для строительства ПЭС [2]. Большинство действующих в настоящее время ПЭС построено на территориях, в которых уровень воды поднимается более, чем на 10 м. Самые высокие приливы на Земле (15–18 м) – бухта Фанди (Канада), в которой с 1985 по 2019 г. эксплуатировалась ПЭС Аннаполис мощностью 20 МВт. Наибольшие приливы в Европе (до 14 м) наблюдаются у побережья Бретани (г. Сан-Мело, Франция), около которого построена ПЭС «Ля Ранс», мощностью 240 МВт. На тихоокеанском побережье в Пенжинской губе (Россия) приливы могут достигать 14 м. [2].

Развитию ПЭ, по сравнению с ветровой и солнечной энергетикой, уделяется достаточно мало внимания. Эффективность современных солнечных панелей составляет от 15 до 22%, а

их производительность напрямую зависит от солнечной активности и времени года. Эффективность ветряных турбин может достигать 40–50%, но сильно зависит от местоположения ветроустановки и скорости ветра. Эффективность ПЭ может достигать 80%, так как приливы предсказуемы и стабильны, но при этом сильно зависит от географических условий, т. е. не каждое море пригодно для строительства ПЭС. Таким образом, развитие ПЭ, как неотъемлемой части энергетического сектора, может принести достаточно большой экономический эффект.

ПЭ основана на явлениях, связанных с гравитационным воздействием Луны и Солнца на Землю. Луна, находясь в орбите вокруг Земли, создает гравитационное притяжение, которое вызывает подъем и падение уровня морской воды – приливы и отливы. Солнце также оказывает влияние, но его эффект меньше по сравнению с Луной. В большинстве мест на Земле наблюдаются два прилива и два отлива в течение суток, которые создают постоянные изменения уровня воды, которые могут быть использованы для генерации электроэнергии. Амплитуда *A* приливов и отливов в течение лунного месяца изменяется в зависимости от положения Луны относительно Земли и Солнца. Во время полнолуний и новолуний, когда Луна, Земля и Солнце располагаются на одной линии, наблюдаются самые высокие приливы, называемые «cpring tides» (весенние приливы). В фазах первой и последней четвертей, когда Луна образует прямой угол с Землей и Солнцем, приливы становятся менее выраженными и называются «neap tides» (мертвые приливы). Учитывая, что Луна проходит через разные фазы примерно каждые 29,5 дней, можно говорить о том, что ПЭ является предсказуемым видом энергии.

Генерирующий потенциал ПЭ зависит от нескольких факторов, таких как географическое положение, топография морского дна, амплитуда приливов и отливов, а также технологических решений, используемых для преобразования энергии. Чем больше разница между уровнем воды во время прилива и отлива (амплитуда), тем больше потенциальной энергии можно извлечь. В некоторых местах, таких как залив Фанди в Канаде, амплитуда прилива может достигать 16 м, что делает его одним из самых мощных мест для приливной энергетики.

Технологии, используемые в ПЭС для генерации электроэнергии, зависят от количества бассейнов, предназначенных для регулирования водного потока, проходящего через турбины. Существует две разновидности таких технологий: с одним и несколькими (например, с двумя) сопряженными бассейнами, в которых может осуществляться как односторонняя, так и двусторонняя проводимость с возможной насосной работой [3]. В первом случае, используется один резервуар, который заполняется во время прилива и опустошается во время отлива (рис. 1, *а*). Энергия в этом случае вырабатывается за счет разности уровней воды между бассейном и морем. Достоинством данной технологии является простота конструкции, низкие эксплуатационные затраты, однако, энергия может вырабатываться только в определенные моменты, что ограничивает общий объем производства. Во втором случае используются два резервуара – один для прилива, другой – для отлива, что позволяет использовать разность уровней воды в обоих бассейнах (рис. 1, *б*). Двойное использование резервуаров позволяет более эффективно регулировать уровень воды, что значительно увеличивает объем вырабатываемой энергии.

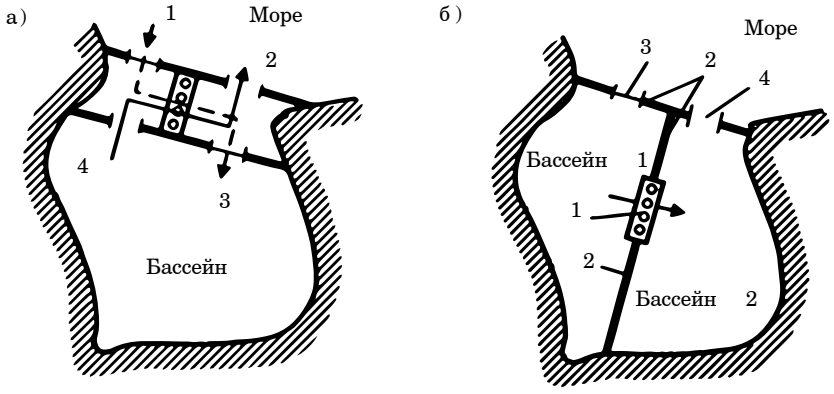


Рис. 1. Приливные электростанции: а – с одним бассейном и двусторонней проводимостью; б – с двумя бассейнами; 1 – здание ПЭС, 2 – водопропускные сооружения, 3 – плотина, 4 – затворы

Перспективным способом использования природных ресурсов для выработки электроэнергии являются приливные лагуны – бухты или заливы, обладающие высоким диапазоном приливов и защищенные от сильных волн и штормов. Это могут быть как естественные, так и искусственные структуры, с минимальным воздействием на окружающую среду.

Перспективным направлением является использование ПЭС в распределенной генерации, хотя на текущий момент единого мнения о том, что из себя она представляет, нет. В [4] даны различные определения данного понятия, в частности, это «генерация в децентрализованной энергосистеме для покрытия потребления в электроэнергии изолированных потребителей»; «генерация на уровне распределенной сети или на стороне потребителя, включенного в сеть» или «производство электрической энергии в местах ее потребления или в непосредственной близости от нее». Каждое из представленных определений по-своему справедливо, но для ПЭС наиболее точно подходит последнее. Для стабильности энергосистемы они способны обеспечить базовую нагрузку, а для обеспечения баланса между производством и потреблением могут работать в сочетании с солнечными или ветровыми электростанциями.

Как отмечалось ранее, в большинстве мест на Земле наблюдаются два прилива и два отлива в течение суток, которые называются полуденным (или семидневным) циклом. Каждый прилив длится примерно 6 ч, после чего наступает отлив, который также длится около 6 ч. В ряде регионов из-за особенностей рельефа могут наблюдаться смешанные приливы, когда высота прилива и отлива различается. Полный цикл прилива и отлива (от одного прилива до следующего) занимает примерно 12 ч и 25 мин, полный цикл – 24 ч и 50 мин, в течение суток могут произойти два высоких прилива и два низких отлива, но их время будет, соответственно, смещаться примерно на 50 мин каждый день. Ввиду такой предсказуемости ПЭ, возможный энергетический потенциал приливной электростанции может быть оценен выражением:

$$W_{ср} = 1{,}97 \cdot A \cdot S_{б}, \text{кВт} \cdot \text{ч/год}, \quad (1)$$

а средняя мощность нормального полусуточного прилива:

$$N_{\text{ср}} = 225 \cdot 10^{-6} \cdot A^2 \cdot S_{\text{б}}, \text{кВт}, \quad (2)$$

где A – среднеквадратичная амплитуда за лунный месяц, м; $S_{\text{б}}$ – средняя площадь бассейна в пределах приливных колебаний, м^2.

В настоящий момент в России действует единственная Кислогубская ПЭС, введенная в эксплуатацию в 1968 г. и имеющая после реконструкции в 2007 г. установленную мощность 1,7 МВт. Станция имеет опытно-экспериментальный статус для испытания инновационных разработок по освоению приливной энергии [2].

В 2021 г. в России вернулись к проекту Пенжинской ПЭС, который был разработан еще в 1972 г. для генерации электроэнергии в заливе Шелихова Охотского моря. Уникальность пролива заключается в том, что минимальное расстояние между противоположными берегами составляет 130 км. Именно в этом месте океанские воды достигают максимальной амплитуды, составляющей 14 м при минимально необходимом уровне в 5 м. Однако, проекту не суждено было реализоваться и одной из основных причин отказа от проекта являлся избыток (по тем временам) энергетических мощностей. Оценки, проведенные по энергетическому потенциалу Пенжинской ПЭС показывали, что она способна генерировать более 100 ГВт электроэнергии в год, и даже на сегодняшний день эта цифра составляет немногим более 40% всей суммарной мощности, вырабатываемой электростанциями различного типа. Еще одна проблема заключалась в том, что в 70-х годах прошлого века такое количество энергии просто негде было использовать. Существующий в настоящее время тренд на снижение углеродного следа и дальнейшее развитие ВИЭ делают проект Пенжинской ПЭС достаточно актуальным для производства чистого водорода. Например, для производства 1 кг водорода методом электролиза в зависимости от его эффективности необходимо от 18 до 40 кВт·ч электроэнергии.

Проектом Пенжинской ПЭС предусмотрено строительство двух створов: Северного – длиной 32,2 км с установленной мощностью 21,4ГВт и Южного – длиной 72 км и мощностью 87,4 ГВт. Суммарная площадь бассейна будет составлять 20530 км^2.

Принимая во внимание, что средняя мощность электростанции прямо пропорциональна квадрату среднеквадратичной амплитуды, то при изменении среднеквадратической амплитуды волны от 9 до 14 м, среднегодовая мощность станции может увеличиться в 2,4 раза.

Строительство приливных электростанций – дорогостоящие проекты, а на реализацию проекта Пенжинской ПЭС необходимо около 600 млрд долларов. Реализация этого проекта чрезвычайно важна, так как благодаря ей Россия может получить статус энергетической

сверхдержавы и первой в мире освоит производство водорода в больших промышленных объемах для внутреннего потребления и экспорта в страны Азии.

Несмотря на то, что энергетической стратегией развития России до 2035 г. определена необходимость перехода на ВИЭ, нормативно-правовая основа по развитию ПЭС практически отсутствует. Можно отметить ГОСТ Р 58650-2019 [3], однако, в нем указаны только основные термины и определения, а векторы развития этой энергетической отрасли отсутствуют. Вместе с тем, энергия, вырабатываемая ПЭС, является экологически чистой и дешевой, а развитие инфраструктуры в местах установки электростанций может привлечь огромное количество туристов при соответствующем взаимодействием с туроператорами и комитетами по дорожному строительству.

Заключение

Предсказуемость и регулярность приливных потоков способна создавать надежные источники электроэнергии, обеспечивая тем самым стабильное электроснабжение, особенно в удаленных и изолированных регионах. Развитие приливной энергетики способствует разработке и внедрению новых технологий и научных исследований, что может повысить общую эффективность энергетического сектора и конкурентоспособность России на международной арене. Заслуживает особого внимания разработка и создание гибридных систем ввиду того, что приливная энергетика может эффективно сочетаться с другими возобновляемыми источниками энергии, что также способствует диверсификации энергетического баланса страны, снижая зависимость от традиционных источников энергии, таких как нефть и газ, что особенно актуально в условиях нестабильности на мировых энергетических рынках.

Библиографический список

1. Мировая энергетика. URL: https://www.eeseaec.org/ (дата обращения: 15.12.2024).

2. *Чернышева О. Б., Лач С. Ю.* Общая энергетика: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2024. 144 с.

3. ГОСТ Р 58650-2019 Приливная и волновая энергетика. Термины и определения. URL: https://vsegost.com/Catalog/72/72147.shtml (дата обращения: 18.12.2024).

4. Экономическая эффективность внедрения возобновляемых источников энергии в Арктической зоне России / С. М. Никоноров, Д. А. Сергеев, И. С. Мокрышев // Вестник Института мировых цивилизаций. 2021. Т. 12, № 3(32). С. 81–89. EDN EOXFZS.

УДК 621.039 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-297-299**

Д. Р. Шейченко*
студент
Н. Л. Гречкин*
старший преподаватель
Е. Ю. Ватаева*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ДЛЯ ОБЪЕКТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

В качестве основных технико-эксплуатационных характеристик для объекта использования атомной энергии разработчиками традиционно используются следующие показатели: назначенный срок службы и назначенный ресурс. Эти показатели должны соответствовать установленным в нормативных документах на объект использования атомной энергии (технических условиях, технических паспортах и описаниях) показателям надежности.
Ключевые слова: *технико-эксплуатационных характеристик, объект использования атомной энергии, назначенный срок службы, назначенный ресурс, показатели надежности.*

D. R. Sheichenko*
Student
N. L. Grechkin*
Senior lecture
E. Yu. Vataeva*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

MAIN TECHNICAL AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS AND RELIABILITY INDICATORS FOR A NUCLEAR ENERGY FACILITY

As the main technical and operational characteristics for a nuclear power facility, developers traditionally use the following indicators: designated service life and designated resource. These indicators must correspond to the reliability indicators established in the regulatory documents for the nuclear facility (technical conditions, technical passports and descriptions).
Keywords: *technical and operational characteristics, nuclear facility, designated service life, designated resource, reliability indicators.*

Анализ остаточного ресурса оборудования объекта использования атомной энергии (ОИАЭ), важного для радиационной безопасности, производится на основе модели пуассоновского потока отказов, характерной для высоконадежных систем. При этом расчет выполнен лишь для сценариев, связанных с возможной радиационной аварией, поскольку в данном случае рассматривается именно фактор радиационной опасности, а не какой-либо иной (например, электро- или пожарная безопасность). Для однородного потока (при λ=const) вероятность отказа на отрезке времени [0,1] определяется формулой:

$$Q(t)=1–P(t)=F(t),$$

где λ – интенсивность отказов, год$^{-1}$; $P(t)$ – вероятность безотказной работы; $E(t)$ – функция распределения отказов.

Определение остаточного ресурса данного типа оборудования, наиболее важного для обеспечения безопасности ОИАЭ, производится по результатам технического обследования его состояния. На основе расчета или имеющихся статистических данных по отказам элементов или систем получены показатели вероятности безотказной работы в год для всех важных для радиационной безопасности элементов.

С использованием значений $P(t)$, полученных на основе схемы функциональной целостности с помощью программных комплексов (ПК) АСМ СЗМА или АСМ-2001 [1, 2], осуществляется расчет показателей надежности для данного объекта автоматизации и энергетики (ОИАЭ). В процессе анализа определяются вклады отдельных элементов и систем в общий показатель надежности объекта. Полученный расчетный показатель, известный как логический критерий функционирования, может представлять собой, например, вероятность отказа, вероятность безотказной работы или наработку на отказ. Этот показатель сопоставляется с рекомендованным нормативным значением. На основе результатов сравнения делаются выводы о степени надежности ОИАЭ и возможности его дальнейшей эксплуатации. В качестве основных показателей надежности целесообразно использовать вероятность безотказной работы объекта и среднюю или гамма-процентную наработку на отказ.

Сравнение расчетного показателя надежности с нормативным позволяет определить гамма-процентный срок службы конкретного элемента ОИАЭ, при котором нормативный показатель ($P_н$) не будет превышен. Одновременно, анализ изменения показателя во времени позволяет установить возможный срок эксплуатации (остаточный ресурс), в течение которого $Pн$ также не будет превышен.

Подобные расчеты могут быть проведены и для каждого вида оборудования или элемента, важного для обеспечения радиационной безопасности ОИАЭ, на основе пооперационного анализа технологической схемы ведения радиационно-опасных работ, логической и функциональной связи операций в соответствии с технологическим регламентом, перечнем возможных исходных событий для выбранных сценариев радиационных авария и статистических данных по вероятностям отказов.

Для оценки надежности ОИАЭ по предельным состояниям третьего типа (т. е. по элементам, не влияющим на радиационную безопасность) рекомендуется простая логико-вероятностная модель роста (или снижения) надежности [3, 4]. В результате применения логико-вероятностной модели для таких элементов получается двухпараметрическая экспоненциальная зависимость вероятности безотказной работы от числа испытаний. В качестве основного принят экспоненциальный изменения закон надежности при постоянной интенсивности потока отказов λ=const.

С учетом принятых допущений при анализе надежности ОИАЭ используем следующие положения:

– интенсивность отказов (λ, год$^{-1}$) в течение назначенного срока службы ($T_н$) для каждого из элементов, влияющих на радиационную безопасность ОИАЭ в целом, принимается на основе расчета по общему логико-вероятностному методу [1];

– в связи с тем, что для сложных восстанавливаемых изделий в машиностроении длительность периода интенсивного старения примерно в два-три раза меньше периода относительного постоянства показателя надежности, с достаточным приближением можно принять, что за пределами $T_н$, (назначенного срока службы) интенсивность отказов возрастает примерно в 2–3 раза, т. е. $\lambda' = (2 \div 3)\lambda$, а вероятность безотказной работы за пределами $T_н$ спадает по экспоненциальному закону:

$$P(t) \text{ (при } t \geq T_н) = P0e^{-\lambda' t},$$

где $P_о$– вероятность безотказной работы ОИАЭ в период назначенного срока службы, год$^{-1}$; t – время эксплуатации (в годах) по окончании $T_н$; λ' – интенсивность отказов ОИАЭ в период его эксплуатации по окончании $T_н$, год$^{-1}$.

Этот подход применим при достижении предельного состояния третьего типа.

По результатам расчета надежности по схеме функциональной целостности для различных сценариев аварий с учетом экспоненциальной зависимости вероятностей отказов элементов и исходных событий рассчитываются вклады отдельных элементов в общую вероятность отказа, выявляются наиболее «слабые» элементы, которые и лимитируют величину остаточного ресурса ОИАЭ. В зависимости от вкладов отдельных элементов или систем в надежность (ресурс) всего объекта разрабатывается комплекс мероприятий по повышению надежности элементов, для которого в соответствии с календарным планом работ на объекте с помощью ПК вновь пересчитываются показатели надежности элементов с учетом их экспоненциальной временной зависимости и показатель надежности всего объекта. На основании полученных результатов составляется план мероприятий, реализация которого обеспечит его дальнейшую безопасную эксплуатацию в течение определенного времени.

Библиографический список

1. *Можаев А. С.* Программный комплекс автоматизированного структурно-логического модели-

рования сложных систем (ПК АСМ 2001) // Труды Международной Научной Школы «Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах» (МА БРК – 2001). СПб.: ООО «НПО ‹Омега›», 2001. С. 56–61.

2. *Можаев А. С., Алексеев А. О.* Автоматизированное структурно-логическое моделирование и вероятностный анализ сложных систем // Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем. Вып. 2 / под ред. И. А. Рябинина. Препринт 104. СПб.: ИПМАШ РАМ, 1994. С. 17–42.

3. *Болотин В. В.* Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984. 312 с.

4. *Труханов В. М.* Надежность в технике. М.: Машиностроение, 1999. 598 с.

ЭЛЕКТРОПРИВОД, ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

УДК 681.51 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-300-303**

В. А. Голубков*
кандидат технических наук, доцент
А. Г. Федоренко*
кандидат технических наук, доцент
Е. Ю. Ватаева*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

В работе исследуются ускоренные испытания транзисторов. В качестве форсирующего фактора используется температура. Получены аналитические выражения для расчета коэффициента ускорения.
Ключевые слова: *ускоренные испытания, коэффициент ускорения, энергия активации.*

V. A. Golubkov*
PhD, Tech., Associate Professor
E. Yu. Vataeva*
PhD, Tech., Associate Professor
A. G. Fedorenko*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ACCELERATED TESTING OF SEMICONDUCTOR DEVICES

The paper studies accelerated tests of transistors. Temperature is used as a forcing factor. Analytical expressions for calculating the acceleration coefficient are obtained.
Keywords: *accelerated tests, acceleration factor, activation energy.*

Ускоренные испытания (УИ) являются эффективными средствами оценки надежности и качества электронных систем. Результаты УИ могут быть использованы при прогнозировании остаточного ресурса устройства. В связи с этим большое значение приобретает создание модели УИ, позволяющей определить коэффициент ускорения (K_y) и учитывающей влияние различных ускоряющих факторов, а также индивидуальные особенности объекта испытания.

Рассмотрим энергетическую модель УИ, в основе которой использовано понятие энергии активизации процесса. Под энергией активизации понимают минимальное значение энергии атомов молекул, электронов, достаточное для преодоления энергетического барьера, препятствующего течению процесса [1].

Применительно к УИ – это процессы старения и деградации в испытуемом объекте. При построении модели пользуемся уравнением Аррениуса:

$$\frac{d\ln K}{dT} = \frac{E_a}{RT^2}, \qquad (1)$$

где T – температура, K – константа скорости реакции, E_a – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная [2].

Это соотношение устанавливает связь между скоростью течения процесса и энергией активации с учетом температуры, т. е. энергией, сообщаемой системе извне.

В работе [3] приводятся соотношения, описывающие скорость протекания процессов теплового старения радиоэлементов. Соотношения эти получены на основе уравнения Аррениуса. Авторы работы [4] отмечают, что термо- и электромагнитные факторы оказывают влияние на кинематические закономерности развития практически всех возможных процессов и явлений и, поэтому могут рассматриваться как наиболее приемлемые ускоряющие воздействия. Большинство физико-химических про-

цессов, связанных с отказами, термически активируемы [1].

Основным форсирующим фактором при УИ является повышенная температура устройства, которая определяется температурой окружающей среды и повышенной электрической нагрузкой [1, 4, 5]. Сущность этих воздействий состоит в сообщении атомам, молекулам, электронам материала полупроводника дополнительной энергии, что приводит к ускорению процессов деградации, связанных с возникновением дефектов в нем.

Интенсивность отказов может быть получена также на основе уравнения Аррениуса:

$$\lambda = \lambda_0 \exp\left(-\frac{E_a}{KT}\right), \quad (2)$$

Коэффициент ускорения:

$$K_У = \frac{\lambda u}{\lambda н}, \quad (3)$$

где λ, λ_o – интенсивности отказов; λ_u, λ_u – интенсивность отказов при УИ и в номинальном режиме.

В соответствии с уравнениями (2) и (3) математическое описание модели УИ с использованием в качестве ускоряющего воздействия повышенной температуры имеет вид [3]:

$$K_У = K_0^{/} \exp\beta_T \left(\frac{1}{T_H} - \frac{1}{T_И}\right), \quad (4)$$

где β_T – энергетический параметр, T_H – температура объекта, работающего в номинальном режиме, $T_И$ – температура объекта, работающего в режиме УИ.

$$K_0^{/} = \frac{\lambda_0 (T_И)}{\lambda_0 (T_H)}. \quad (5)$$

Если $\lambda_0 (T_И) = \lambda_0 (T_H)$, то (4) можно представить в виде:

$$K_У = \exp\beta_T \left(\frac{1}{T_H} - \frac{1}{T_И}\right). \quad (6)$$

Энергетический параметр β_T для полупроводниковых элементов определяется как

$$\beta_T = \frac{E_a}{K}, \quad (7)$$

где K – постоянная Больцмана; E_a – энергия активации.

Положительным моментом такой физико-энергетической модели является учет физических процессов деградации полупроводника, возможность определения коэффициентов ускорения в зависимости от режимов испытания и, соответственно, выбор режимов испытаний, при которых можно получить требуемый коэффициент ускорения.

Как видно из (7), величина энергетического фактора, определяющего коэффициент ускорения, зависит от энергии активации процесса.

Рассмотрим с физической точки зрения кинетику явлений, происходящих в материале полупроводника в процессе УИ. В ходе ускоренных испытаний (при воздействии повышенных температур или электрических воздействий) в кристалле полупроводника возникают разносторонние дефекты, которые, в свою очередь, вызывают изменение параметров и свойств полупроводника, т. е. ведут к его деградации.

Энергия активации процесса образования дефектов зависит от их вида. Известно, что в реальном кристалле в зависимости от воздействия внешних факторов (температура, электрическое поле) могут возникать разнообразные дефекты:

– точечные дефекты,

– линейные дефекты,

– плоские дефекты (границы монокристалла, зерен, двойников),

– объемные дефекты – трещины, полости, включения другой фазы и т. д.

В настоящее время большинство исследований по физике твердого тела посвящено прямо или косвенно изучению дефектов в кристаллах, т. к. дефекты влияют практически на все свойства полупроводников. Мы остановимся здесь на рассмотрении точечных дефектов, которые возникают в кристалле в процессе УИ. Точечные дефекты – это густые узлы, атомы в междоузлиях, нарушения в правильности чередования атомов основного вещества, а также примеси посторонних атомов, которые также в зависимости от своих размеров могут располагаться и в узлах, и в междоузлиях. Если число точечных дефектов велико, то они начинают взаимодействовать друг с другом и образуют более или менее крупные комплексы. Концентрация точечных дефектов может колебаться в весьма широких пределах, и она весьма чувствительна к температуре.

Под влиянием электрического поля, температуры концентрация точечных дефектов меняется по экспоненциальному закону. По мере повышения температуры кристалла возрастает амплитуда тепловых колебаний атомов. Часть

из них приобретает при этом настолько большую энергию, что атомы срываются из равновесных положений и переходят в междоузлие. Возможен и обратный процесс. Причем для образования атома в междоузлие требуется большая энергия, чем создание густого узла.

Суммарная энергия активации [7] этих процессов, т. е. энергия, необходимая для совершения акта перехода атома из узла в междоузлие и обратно, может быть определена следующим образом:

$$E_{a\Sigma} = E_{a1} + E_{a2}, \quad (8)$$

где E_{a1} – энергия активации процесса перехода атома из узла в междоузлие; E_{a2} – энергия активации обратного процесса или энергетическое образование густого узла.

Пусть число атомов данного сорта в единице объема полупроводника – N, из них n – перешли в междоузлие. Энергия активации этого процесса – E_{a_1}.

Тогда вероятность $W_Д$ того что еще один атом перейдет в междоузлие, будет пропорциональна числу атомов еще сидящих в узлах, т. е. (N-n) и вероятности того, что один из этих атомов приобретает необходимую для такого перехода энергию, т. е. экспоненциальному множителю $e^{-\frac{E_{a1}}{KT}}$.

Таким образом,

$$W_Д = \alpha(N-n)e^{-\frac{E_{a1}}{KT}}, \quad (9)$$

здесь α – постоянный коэффициент.

Вероятность обратного процесса, т. е. возвращение атома в пустой узел W_P, будет пропорциональна числу атомов в междоузлие n и числу пустых узлов, точнее, тому, что атом в междоузлии «наткнется» на пустой узел.

$$W_P = \beta n\frac{n}{N}, \quad (10)$$

где β – постоянный коэффициент.

Тогда скорость процесса образования дефектов:

$$\frac{dn}{dt} = \alpha(N-n)e^{-\frac{E_{a1}}{KT}} - \frac{\beta n^2}{N} \quad (11)$$

При равновесии, когда вероятности обоих процессов равны и $\frac{dn}{dt} = 0$, полагая n<<N, получаем:

$$n \approx \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}Ne^{-\frac{E_{a1}}{KT}}, \quad (12)$$

здесь $\sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}N = \sqrt{NN_1}$, или $\frac{\alpha}{\beta} = \frac{N_1^*}{N}$,

где N_1^* – общее число междоузлий, в которых могут разместиться n перешедших в них ионов.

Концентрация пустых узлов:

$$n_1 = \sqrt{NN'}e^{-\frac{E_{a1}}{KT}}. \quad (13)$$

Отношение:

$$\frac{n_1}{n} \approx e^{-\frac{E_{a_2}-E_{a_1}}{KT}} \quad (14)$$

Для E_{a1} и E_{a2} ≈1ЭВ разность их порядка приблизительно несколько десятков ЭВ, и т. к.

$$KT \approx 0{,}03 \text{ ЭВ, то } \frac{n_1}{n_2} = e^{\pm 10}$$

Эта оценка показывает, что маловероятно, что число дефектов обоих сортов будет одного и того же порядка. Так что обычно имеет место один из них.

Получены аналитические выражения для коэффициента ускорения при форсированных испытаниях с помощью температурного фактора. Проанализированы точечные дефекты структуры, которые, в свою очередь, вызывают изменение параметров и свойств полупроводника, ведут к деградации и сокращению ресурса его работы. Доказано, что при повышении температуры появляются дефекты структуры, которые проявляются либо в виде «густых узлов», либо «атомов в междоузлиях». Одновременное их появление маловероятно.

Библиографический список

1. *Никулин С. М.* Надежность элементов радиоэлектронной аппаратуры. М.: Энергия, 1979.

2. *Ормонт Б. Ф.* Введение в физическую химию и кристаллографию полупроводников. М.: Высшая школа, 1968. 487 с.

3. *Груничев А. С., Веденеев Ю. З., Елкин В. М.* Надежность электрорадиоизделий при хранении. М.: Энергоатомиздат, 1983. 160 с.

4. Обеспечение качества РЭА методами диагностики и прогнозирования / Под ред. М.С. Данилина. М.: Изд-во стандартов, 1983. 198 с.

5. Надежность полупроводниковых устройств / Под ред. А. А. Маслова. М.: Иностранная литература, 1963. 426 с.

6. *Стильбанс Л. С.* Физика полупроводников. М.: Советское радио, 1967.

7. *Дульский Г. И., Старостин С. В., Французов С. С.* Экспресс-метод определения коэффициента ускорения и энергии активации при оценке соответствия изделий электронной компонентной базы требованиям надежности // Научно-технический журнал «Радиоэлектронная отрасль: проблемы и решения». 2024. № 1(13). С. 22–27.

УДК 666.119 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-304-309**

В. А. Давыдов*
магистрант
В. Ю. Головин*
магистрант
В. В. Булатов*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА

Произведен поиск методов обнаружения дефектов листового стекла, определены наиболее актуальные существующие решения. Выполнен анализ полученной информации по теме, результат сведен в сравнительную таблицу и определен наиболее оптимальный метод детектирования.
Ключевые слова: *дефекты листового стекла, пороки, инфракрасная дефектоскопия, ультразвуковая дефектоскопия, рентгенографическая дефектоскопия, спектроскопия, системы технического зрения.*

V. A. Davydov*
Postgraduate Student
V. Y. Golovin*
Postgraduate Student
V. V. Bulatov*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

METHODS FOR DETECTING FLAT GLASS DEFECTS

The search for software solutions for the stimulation of mobile robotic complexes has been carried out, the most relevant existing developments have been identified. The analysis of the received information on the topic was performed, the results were summarized in a comparative table and the most optimal scenarios for the use of these software complexes were determined.
Keywords: *defects of flat glass, defects, infrared flaw detection, ultrasonic flaw detection, X-ray flaw detection, spectroscopy, machine vision systems.*

Введение

В настоящее время в России, наравне с другими отраслями промышленности, активно развивается стекольная промышленность. Предприятия данной отрасли все больше модернизируют и автоматизируют свои технологические процессы производства, тем самым увеличивая скорость и улучшая качество выпуска продукции.

На данный момент основным способом производства листового стекла в России является «флоат-метод» (рис. 1). Сущность данного метода заключается в наливе расплавленной стекломассы на слой расплавленного олова под действием сил поверхностного натяжения [1], что обеспечивает равномерную толщину и высокое качество поверхности изготавливаемого стекла.

При изготовлении стекла, как и на любом другом производстве, существует некоторый процент брака изготовленных изделий. Причинами возникновения брака стекла служат отклонения или нарушения технологического процесса: нарушения режима охлаждения форм и машин, несоблюдение температурного режима стекломассы в питателе и т. д. [2]. Дефекты листового стекла называют пороками, согласно ГОСТ [3]. Выделяют три основные группы пороков стекла: газовые включения (пузырь, мошка), твердые включения (камень), стекловидные включения (свиль, шлир). Для каждого типа стекла существуют свои требования по количеству и характеру пороков. Возникает проблема обнаружения и точной классификации порока листового стекла согласно ГОСТ [4]. В связи с этим, а также для улучшения качества изделий и уменьшения бракованной продукции, появляется необходимость в обнаружении пороков листового стекла, с последующим принятием мер по устранению причин их возникновения.

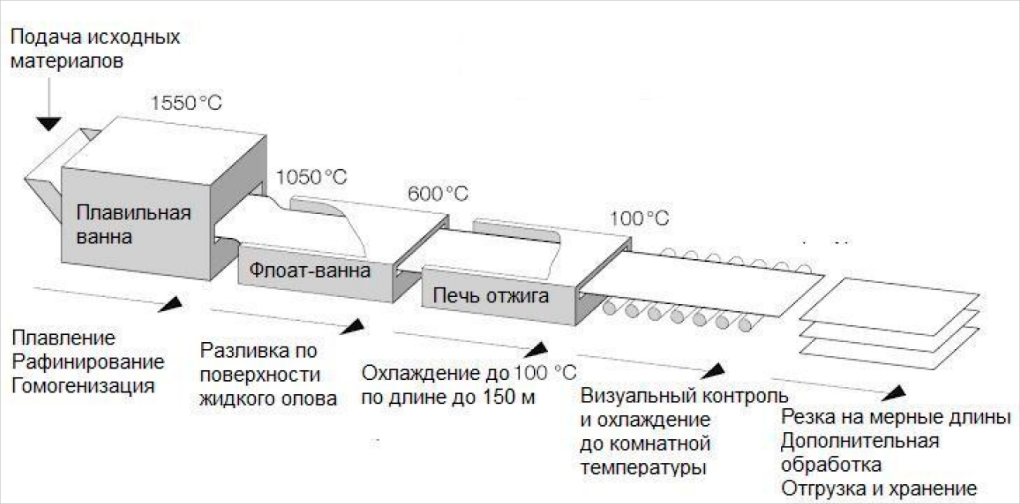


Рис. 1. Технологический процесс «флоат-метода» изготовления стекла

Методы детектирования

Существует несколько подходов к обнаружению пороков листового стекла, отличающихся используемыми технологиями и оборудованием. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Все они относятся к методам неразрушающего контроля. В данной статье будет рассмотрено пять методов обнаружения пороков листового стекла.

Инфракрасная дефектоскопия. Это метод неразрушающего контроля, в котором используются термографические измерения теплового отклика исследуемого материала после внешнего воздействия на него. Данный подход используется для бесконтактного инфракрасного неразрушающего контроля материалов [5].

Метод инфракрасной дефектоскопии (рис. 2) основан на возбуждении исследуемого объекта с помощью внешнего источника, передающего исследуемому материалу определенное количество энергии. Источником возбуждения могут быть ультразвуковые излучатели, вспышки, галогенные лампы или другие устройства. Возбуждение приводит к тепловой реакции в исследуемом объекте, которая фиксируется инфракрасной камерой. Использование подходящего сочетания процедуры возбуждения, ее источника, метода анализа и инфракрасной камеры позволяет получить информацию о структуре поверхности исследуемого объекта, а также о неоднородностях материала и подповерхностных дефектах.

Для активного теплового контроля с целью оценки результатов неразрушающего контроля был разработан широкий спектр методов. Выбор одного из них определяется областью применения, используемым источником возбуждения и типом возбуждения. Он может быть импульсным, периодическим или непрерывным. В простейшем случае отклик наблюдается непосредственно на термограмме. Однако в большинстве случаев требуется использование передовых способов анализа. Наибольшее распространение получили методы оценки с помощью блокировки, импульсного или переходного (ступенчатого) возбуждения, а в некоторых случаях применяется непрерывное возбуждение [6].

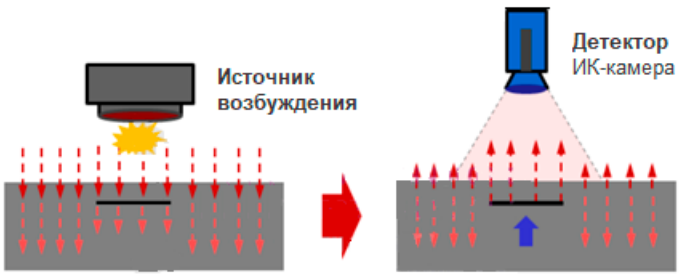


Рис. 2. Принцип метода инфракрасной дефектоскопии

Данный метод позволяет выявлять пустоты, включения, неоднородности и трещины в листовом стекле, отражая их в виде температурных аномалий. Ограничениями, при использовании данного подхода являются: глубина проверки, а также размер и ориентация дефекта в материале.

Ультразвуковая дефектоскопия. В основе метода лежит исследование процесса распространения ультразвуковых колебаний в исследуемых изделиях при помощи ультразвукового преобразователя и дефектоскопа [7].

Метод ультразвуковой дефектоскопии, своим принципом работы, схож с инфракрасной дефектоскопии тем, что в обоих случая происходят процессы возбуждения и приема волн. Эти процессы осуществляются за счет применения ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей, использующих прямой и обратный пьезоэлектрический эффекты.

Рассматриваемый метод основан на принципе неизменности траектории звуковой волны в однородном материале. Отражение звуковых волн происходит только в том случае, когда звуковая волна проходит границу раздела сред с разными удельными акустическими сопротивлениями (рис. 3). Если в листовом стекле содержатся пороки вида «пузырь», то удельное акустическое сопротивление газа или воздуха, находящегося внутри них, будет в несколько раз меньше, чем у самого стекла, следовательно отражение будет практически полное.

Разрешающую способность исследования стекла, данным методом, можно увеличить за счет увеличения частоты вводимых колебаний. Это приведет к уменьшению длины звуковой волны, а значит, и к нивелированию дифракции волн [8].

Несмотря на высокую скорость исследования, данный метод дефектоскопии не может дать информацию о размерах и ориентации дефекта, только о его существовании.

Рентгенографическая дефектоскопия. Метод неразрушающего контроля, который использует ионизирующее излучение для обнаружения дефектов в исследуемом материале.

Промышленная рентгенография основывается на поглощении рентгеновских лучей плотной средой [9]. В рассматриваемом методе могут использоваться следующие виды излучения: рентгеновское излучение, которое генерируется при помощи рентгеновского генератора, гамма-излучение, которое генерируется естественной радиоактивностью герметичных источников радионуклидов. После генерации рентгеновские лучи проходят сквозь исследуемое изделие и фиксируются детектором, таким как люминесцентная пластина или галогенная пленка (рис. 4). Чем плотнее материал исследу-

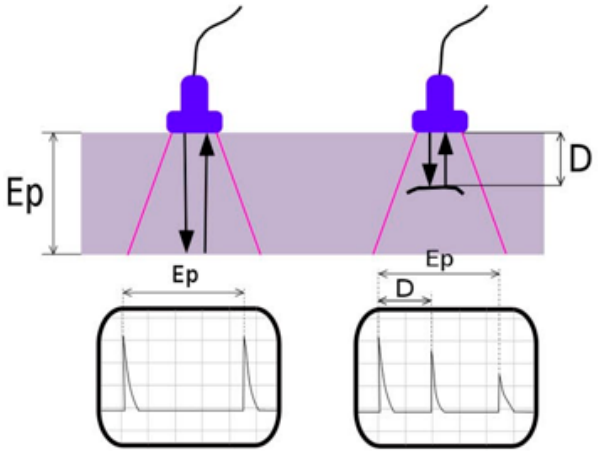


Рис. 3. Принцип метода ультразвуковой дефектоскопии

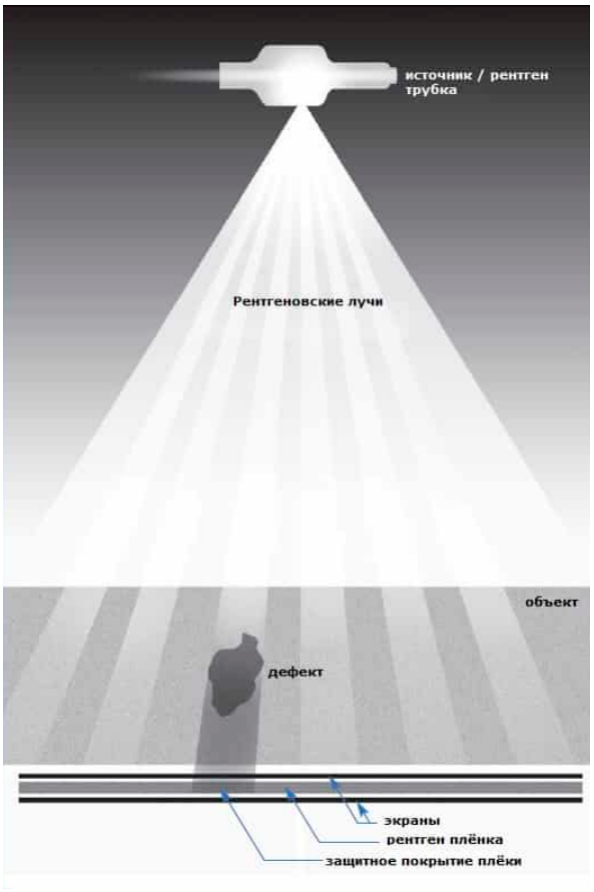


Рис. 4. Принцип метода рентгенографической дефектоскопии

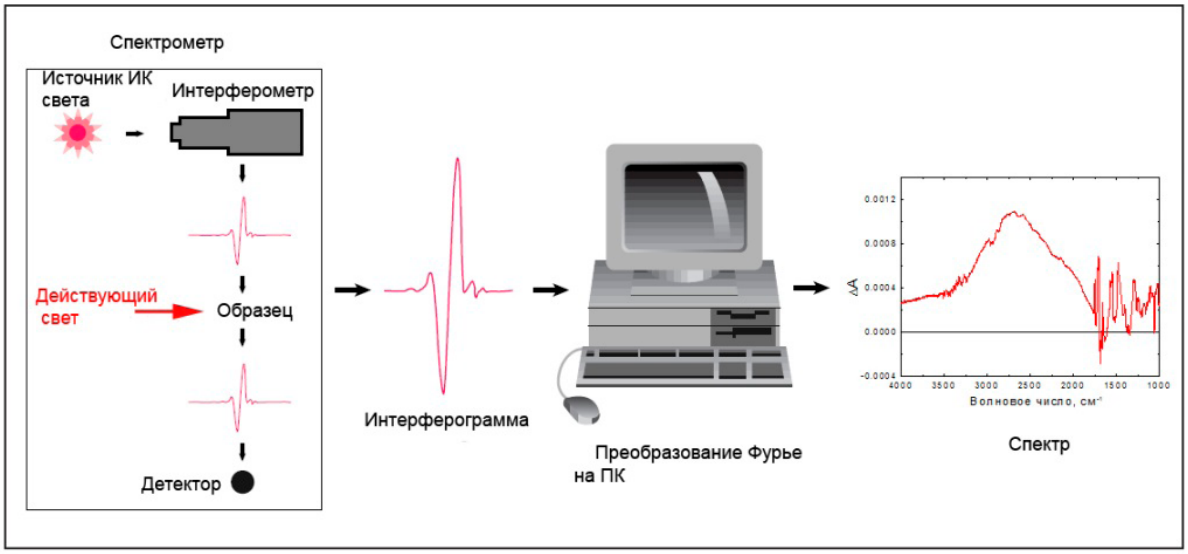


Рис. 5. Принцип метода спектроскопии

емого объекта, тем больше рентгеновских лучей он поглощает. Отсюда вытекает то, что после облучения объекта, галогенной пленкой будет зафиксировано только небольшое количество рентгеновских лучей. При наличии пороков в стекле, на пленке будут возникать светлые или темные пятна, по сравнению с основной структурой стекла, в зависимости от вида порока. Снимок, получаемый в результате облучения, называется рентгенограммой.

Основная проблема, при использования данного метода – безопасность персонала. В связи с этим оператор должен использовать передовые методы защиты, чтобы минимизировать дозу получаемого облучения [10].

Спектроскопия. Метод неразрушающего контроля, который производит анализ вещества, основанный на изучении его спектров поглощения и излучения.

Метод спектроскопии основан на явлении интерференции электромагнитного излучения. В частности, в Фурье-спектроскопии применяются интерферометры, включая интерферометр Майкельсона, интерферометр Фабри – Перо и ламеллярный интерферометр [10]. Эти устройства преобразуют инфракрасное излучение от источника в параллельный пучок, который разделяется на два луча, способствующих интерференции. В результате формируется сложная интерференционная картина, подлежащая анализу с использованием Фурье-преобразования. Данный процесс позволяет получить спектр поглощения исследуемого образца, что, в свою очередь, обеспечивает возможность определения его структуры и свойств. Благодаря этому методу можно выявить наличие примесей, неоднородностей, инородных тел и газов внутри исследуемого образца. Принцип работы метода спектроскопии представлен на рис. 5.

В связи с тем, что метод спектроскопии требует использования дорогостоящего оборудования, а результаты исследования, хоть и являются достаточно точными, но время, затраченное на их обработку достаточно велико, данный метод может быть использован не на всех предприятиях, а только там, где требуется практически идеальное качество изготавливаемой продукции.

Метод на основе применения систем технического зрения. Рассматриваемый метод использует оптико-электронную систему, работающую на основе технологии технического зрения. Данная система состоит из камеры технического зрения, источника света, обеспечивающего равномерное рассеивание света, а также ЭВМ для обработки изображений [11].

Метод основан на явлении преломления света на границе двух сред. При переходе между средами, имеющими отличные друг от друга показатели преломления, лучи меняют направление своего распространения. При прохождении лучей света через исследуемый образец, в местах наличия пороков, лучи распадаются, некоторая часть из них рассеивается, что приводит к искажению изображения. Полученное искажение фиксируется камерой технического зрения, после чего ЭВМ анализирует полученные изображения и определяет наличие, местоположение, а также класс пороков.

Достоинством данного метода является то, что это позволяет автоматизировать процесс

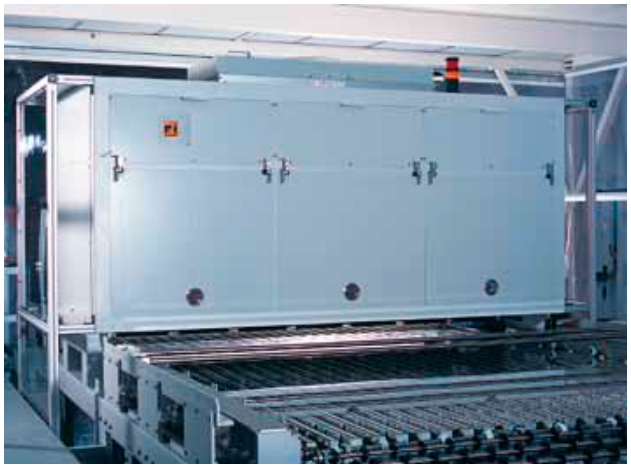


Рис. 6. Система контроля листового стекла Glass Inspect фирмы Dr. Schenk

детектирования пороков стекла. При этом происходит не только обнаружение, но также и классификация порока, согласно ГОСТ [3]. Помимо этого, систему технического зрения достаточно просто внедрить в производственный процесс. Результат внедрения системы контроля листового стекла Glass Inspect фирмы Dr. Schenk в производственный процесс представлен на рис. 6.

Каждое промышленное предприятие, которое занимается производством листового стекла, стремится повысить качество выпускаемой продукции. Следовательно, в ходе разработки технологического процесса, уделяется отдельное внимание каждому из узлов процесса. Несмотря на то, что метод обнаружения дефектов листового стекла выбирается каждым предприятием отдельно, учитывая все аспекты производства и требования к выпускаемой продукции, существуют определенные критерии, на которые предприятия обращают особое внимание при выборе метода детектирования. Все вышеописанные методы можно сравнить между собой по следующим основным критериям:

1. Точность определения дефектов – способность метода точно обнаруживать и классифицировать пороки.

2. Скорость анализа – время, необходимое на обнаружение и классификацию порока.

3. Стоимость – затраты на оборудование, обучение персонала.

4. Простота использования – степень сложности использования метода.

5. Влияние внешних факторов – зависимость метода от условий окружающей среды.

В табл. 1 приведена оценка методов детектирования по каждому из критериев.

Таблица 1

Оценка методов обнаружения дефектов листового стекла

Метод/ критерий	Точность определения дефектов	Скорость анализа	Стоимость	Простота использования	Влияние внешних факторов
Инфракрасная дефектоскопия	Высокая	Высокая	Высокая	Средняя	Среднее
Ультразвуковая дефектоскопия	Средняя	Высокая	Средняя	Средняя	Низкое
Рентгеновская дефектоскопия	Средняя	Высокая	Средняя	Средняя	Среднее
Спектроскопия	Высокая	Низкая	Очень высокая	Низкая	Среднее
Система технического зрения	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Высокое

Заключение

Проанализировав каждый из методов, можно сделать вывод о том, что самым оптимальным является применение систем технического зрения. Хорошим вариантом будет использование комбинированного контроля, например: использование системы технического зрения и ультразвуковой дефектоскопии. Однако использования системы технического зрения будет вполне достаточно для удовлетворения большинства требований, предъявляемых к выпускаемой продукции на предприятиях по производству листового стекла. Высокая стоимость оборудования, а также влияние внешних факторов, полностью компенсируются точностью и скоростью процесса обнаружения дефектов, а также простотой использования оборудования. При этом внедрение системы технического зрения в технологический процесс повлечет за собой автоматизацию процесса контроля листового стекла, а также увеличит качество выпускаемой продукции. Таким образом, внедрение систем технического зрения поможет существенно улучшить производственные процессы в сфере стекольной промышленности.

Библиографический список

1. ИТС 5 – 2015 Производство стекла. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. М.: Бюро НДТ, 2015. 99 с.

2. Проблемы автоматизированного контроля дефектов стеклоизделий / С. А. Рожков, Д. А. Бражник, А. В. Серов // Проблемы региональной энергетики. 2006. № 1. С. 113–125.

3. Гост 32361-2013. Стекло и изделия из него. Пороки. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 2015. 11 с.

4. ГОСТ 111-2001 Стекло листовое. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2001. 34 с.

5. Активная термографическая проверка загрязнения защитного стекла на лазерных сканирующих головках / Дж. Скала [и др.] // Прикладная оптика. 2016. D60. doi:10.1364/AO.55.000D60.

6. Активная термография / Х. Будзир [и др.] / Справочник по расширенной неразрушающей оценке. Cham: Springer International Publishing. 2018. С. 1–19.

7. Контроль качества сварки: учеб. пособие для машиностроительных вузов / В. Н. Волченко [и др.]. М.: Машиностроение, 1975. 328 с.

8. *Выборнов Б. И.* Ультразвуковая дефектоскопия. М.: Металлургия, 1985. 251 с.

9. *Кишковский А. Н., Тютин Л. А., Есиновская Г. Н.* Атлас укладок при рентгенологических исследованиях. Л.: Медицина, 1987. 520 с.

10. *Смит А.* Прикладная ИК-спектроскопия: основы, техника, аналитическое применение. М.: Мир, 1982. 328 с.

11. Патент №115463 Российская федерация, МПК G01B 7/00. Устройство автоматизированного детектирования пороков стекла / Булатов В. В., Абакумов И. И., Кульчицкий А. А., Шабанов В. А., Наумова А. К. 2011. 8 с.

УДК 621.313.12 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-310-314**

А. В. Зайниев*
аспирант
М. И. Хакимьянов*
доктор технических наук, доцент
**Уфимский государственный нефтяной технический университет*

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ГАЗОПОРШНЕВЫХ АГРЕГАТОВ С СИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Рассмотрены подходы к построению алгоритма мониторинга и управления техническим состоянием сложных технических систем, в том числе электротехнических комплексов. Предложен алгоритм, который, помимо поиска неисправностей, учитывает показатели надежности функциональных элементов, а также интегральный показатель фактического технического состояния в настоящем и его прогнозное значение на межремонтный интервал. Предложенный алгоритм позволяет повысить качество управления техническим состоянием и может стать основой для совершенствования стратегии ремонтов газопоршневых агрегатов по фактическому техническому состоянию.
Ключевые слова: *техническая диагностика, синхронный генератор, газопоршневой агрегат, индекс технического состояния, прогнозирование, управление техническим состоянием.*

A. V. Zainiev*
PhD Student
M. I. Khakimyanov*
Dr. Sc., Tech., Associate Professor
**Ufa State Petroleum Technological University*

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR MONITORING AND CONTROLLING THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL COMPLEXES OF GAS PISTON UNITS WITH SYNCHRONOUS GENERATORS

Approaches to the construction of an algorithm for monitoring and controlling the technical condition of complex technical systems, including electrical engineering complexes, are considered. The algorithm is proposed, which, in addition to fault finding, takes into account the reliability indicators of functional elements, as well as the integral indicator of the actual technical condition in the present and its predicted value for the overhaul interval. The proposed algorithm allows to improve the quality of technical condition management and can become the basis for improving the strategy of repairs of gas piston units according to the actual technical condition.
Keywords: *technical diagnostics, synchronous generator, gas piston unit, technical condition index, forecasting, technical condition management.*

Введение

Газопоршневые агрегаты (ГПА) представляют собой источники энергии, преобразующие химическую энергию газообразного топлива в электрическую энергию с помощью поршневого двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и синхронного генератора переменного тока. Газопоршневые агрегаты находят широкое применение в различных отраслях промышленности, в частности, в нефтегазодобывающей промышленности для утилизации попутного нефтяного газа и в малой распределенной энергетике.

При эксплуатации ГПА, используемых для утилизации попутного нефтяного газа и выработки электроэнергии на объектах добычи нефти, неизбежно возникает ухудшение их технического состояния. Это обусловлено конструкцией самих ГПА, функциональные элементы которых находятся под воздействием множества различных неблагоприятных воздействий, таких как высокая температура, высокое давление, повышенное трение и т. д. Кроме того, неизбежно отрицательное влияние внешних факторов, таких как изменение состава попутного нефтяного газа, в том числе содержа-

ния в нем агрессивных компонентов, резкие наброс нагрузок при включении в работу новых скважин и т. д. [1].

Данный факт делает актуальной задачу технического диагностирования неисправностей ГПА, приводящих к остановке нефтяных скважин либо потере устойчивости системы с собственными источниками электроэнергии. Решение этой задачи способствует повышению надежности электротехнического комплекса с ГПА и снижению эксплуатационных затрат, связанных с авариями и дополнительными затратами на внеплановые ремонты.

В соответствии с ГОСТ 20911-89 [2], алгоритм технического диагностирования (контроля технического состояния) определяется как совокупность предписаний, определяющих последовательность действий при проведении диагностирования (контроля).

Существует несколько походов к построению алгоритмов технического диагностирования, например:

– алгоритм диагностирования, основанный на анализе функциональной схемы, минимизирующий среднюю стоимость определения состояния системы [3];

– алгоритм поиска дефекта по показателю безотказности структурной единицы [4];

– алгоритм поиска места отказа с минимальными затратами методом ветвей и границ [5];

– алгоритм динамического программирования (поиск отказов в системе из последовательно соединенных элементов с равностоимостными проверками в случае отказа одного элемента) [6];

Основным недостатком перечисленных алгоритмов является то, что они направлены исключительно на поиск отказавшего элемента.

Другим подходом к задачам технической диагностики является теория статистических решений, при которой техническая диагностика выполняется на основе теории вероятностей и математической статистики [7]. Данный подход имеет свой существенный недостаток, заключающийся в сложности получения выборки статистических данных требуемого объема.

Таким образом поиск новых алгоритмов технической диагностики ГПА, учитывающих фактическое и прогнозируемое техническое состояние объекта, является актуальной задачей.

Методы

Газопоршневые агрегаты можно представить в виде сложного электротехнического комплекса объекта со следующими свойствами:

– возможность декомпозиции на конечное число функциональных элементов, значимых с диагностической точки зрения;

– взаимодействие и влияние друг на друга функциональных элементов при выполнении своих функций для преобразования химической энергии газообразного топлива в электрическую энергию;

– диагностические признаки определяются свойствами элементов системы и характером их взаимодействия;

– для определения параметров ГПА и выделения диагностических признаков требуются одновременные измерения и обработка функционально взаимосвязанных параметров;

– наличие регулируемых и нерегулируемых управляющих воздействий, и неопределенных внешних возмущений;

– неисправность любого функционального элемента приводит к параметрическому (с выходом параметров функционирования за допустимые пределы) или функциональному (приводящему к прекращению выполнения функций) отказу [1, 8].

Таким образом, ГПА, как объект диагностирования можно рассматривать как «черный ящик», преобразующий одни величины $x_i\,(i=1,2,\ldots m)$, которые вводятся в объект (параметры топливного газа, окружающей среды, управляющих воздействий и т. д.), в другие величины $y_j\,(i=1,2,\ldots n)$, которые являются реакциями объекта (напряжение, мощность, температура выхлопных газов и т. д.), как показано на рис. 1. При этом, на объект воздействуют внешние факторы $z_k\,(k=1,2,\ldots l)$, такие как параметры окружающей среды, нагрузки, внешней электрической сети и т. д. и внутренние факторы $\alpha_\gamma\,(\gamma=1,2,\ldots\varepsilon)$ (износ функциональных элементов, характеристики моторного масла и т. д.) [9].

Очевидно, что функциональные элементы (элементы декомпозиции) ГПА, например, коленчатый вал двигателя внутреннего сгорания и обмотка статора генератора, имеют разные показатели надежности, так как имеют раз-

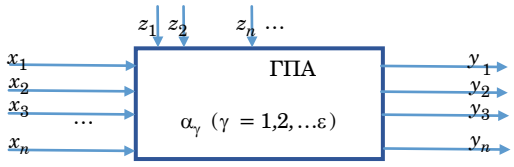


Рис. 1. Представление ГПА в виде «черного ящика»

Таблица 1

Диапазоны индекса технического состояния

Диапазон индекса технического состояния, о.е.	Вид технического состояния	Вид технического воздействия
≤0,25	Критическое	Вывод из эксплуатации, техническое перевооружение и реконструкция
0,25 < и ≤0,50	Неудовлетворительное	Дополнительное техническое обслуживание и ремонт, усиленный контроль технического состояния, техническое перевооружение
0,50 < и ≤ 0,70	Удовлетворительное	Усиленный контроль технического состояния, капитальный ремонт, реконструкция
0,70 < и ≤ 0,85	Хорошее	По результатам планового диагностирования
0,85 < и ≤ 1,00	Очень хорошее	Плановое диагностирование

ные скорости износа. Соответственно, скорость изменения элементов множества будет существенно различаться. В связи с этим, для определения приоритетного поиска дефектов и последующего технического воздействия целесообразно знать показатели надежности отдельных функциональных элементов ГПА. В работе [10] показано, что применение метода анализа иерархий (МАИ) позволит оценить надежность ГПА и их функциональных узлов с учетом установленных нормативной документацией критериев в целях определения наименее надежных функциональных узлов и последующего определения приоритетов технического воздействия на них.

Множество в некоторый дискретный момент времени можно охарактеризовать некой интегральной величиной физического износа. Для расчета физического износа на практике применяется индекс технического состояния – интегральный показатель фактического технического состояния, который объединяет значения ряда других показателей технического состояния в единую величину, удобную для сравнения и оценки [11]. Как показано в работах [8, 12], для задач определения индекса технического состояния объекта диагностирования на фоне большого объема входных данных и в быстро меняющихся условиях , наиболее подходящим является инструмент нечеткой логики. Нейро-нечеткий логический вывод с использованием нейро-нечетких контроллеров позволяет определить индекс технического состояния по набору выбранных входных и выходных параметров объекта ~~и~~ [12].

В табл. 1 приведены виды технического состояния оборудования и (или) объектов электроэнергетики в соответствии с [13].

Пограничным значением индекса технического состояния является 0,70 (хорошее состояние), при котором не требуется технического воздействия на объект кроме планового диагностирования.

Математическая модель расчета индекса технического состояния ГПА с использованием нейро-нечетких контроллеров подробно рассмотрена в работе [12].

На рис. 2 представлено общее расположение областей множества технических состояний объекта [8].

Переход состояния ГПА из области 4 в область 1 (рис. 2) может быть, как постепенным, возникающим в результате постепенного изменения значений одного или нескольких факторов и обусловленным износом функциональных элементов, так и внезапным, характеризующимся скачкообразным изменением одного или нескольких факторов и и переходом объекта в неработоспособное состояние, происходящим по причине непредусмотренных перегрузок, ошибок обслуживающего персонала, сбоев системы управления, дефектов материала, погрешностей изготовления и т. п. [8, 9].

Очевидно, что внезапные отказы, в отличие от постепенных, спрогнозировать практи-

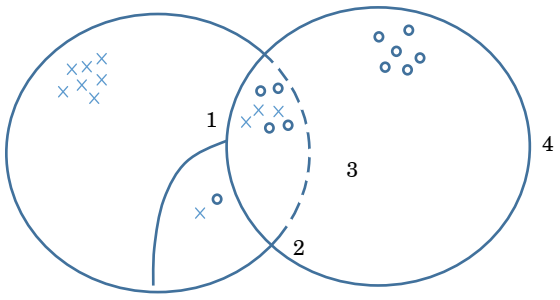


Рис. 2. Множество состояний ГПА как объекта диагностирования: 1 – область отказов; 2 – область неработоспособных состояний с правильным функционированием в определенных режимах; 3 – область работоспособных состояний; 4 – область исправных состояний

чески невозможно. Однако прогнозирование изменения во времени множества, то есть индекса технического состояния, имеет практическую значимость. Основной целью прогнозирования является уменьшение риска при принятии решений. Конечная эффективность любого решения зависит от последовательности событий, возникающих уже после принятия решения. Возможность предсказать неуправляемые аспекты этих событий перед принятием решения позволяет сделать наилучший выбор. Знание прогнозируемого изменения состояния технических объектов позволяет обслуживающему персоналу принимать оптимальные решения о сроках и объемах ремонта и, тем самым, повышать надежность объектов [12]. Подробно подходы и методы прогнозирования индекса технического состояния ГПА методами машинного обучения рассмотрены в работе [12].

Результаты

Таким образом, алгоритм мониторинга и управления техническим состоянием газопоршневого агрегата может быть представлен в виде, представленном на рис. 3.

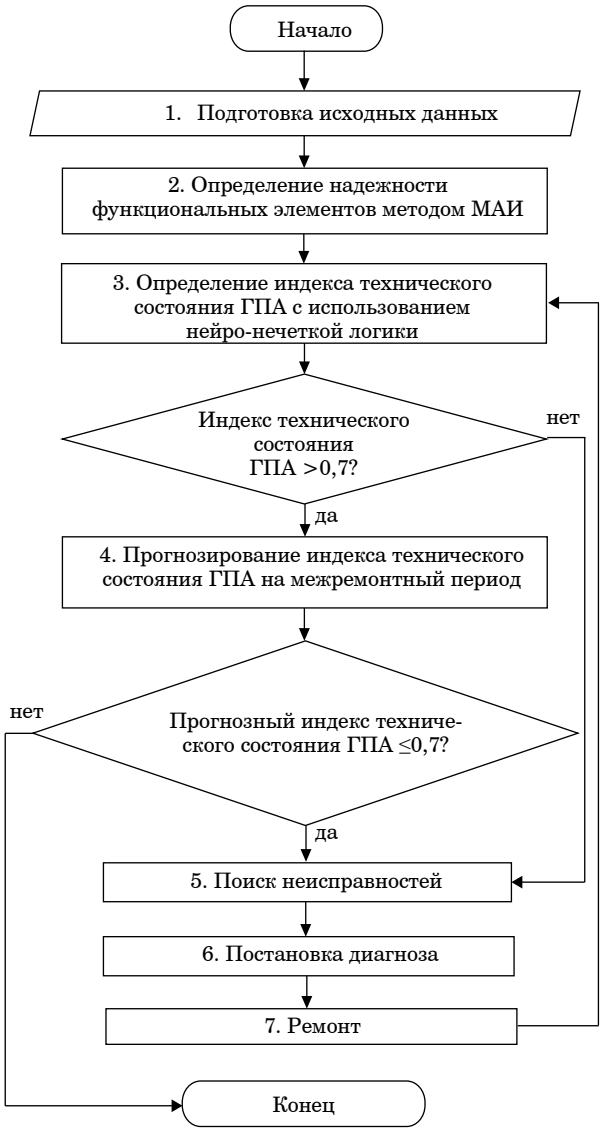


Рис. 3. Алгоритм мониторинга и управления техническим состоянием газопоршневого агрегата

Заключение

1. Предложен алгоритм мониторинга и управления техническим состоянием ГПА, находящегося в эксплуатации, который, помимо поиска неисправностей, учитывает показатели надежности функциональных элементов газопоршневого агрегата, а также интегральный показатель фактического технического состояния в настоящем и его прогнозное значение на межремонтный интервал времени.

2. Предложенный алгоритм позволяет повысить качество мониторинга и управления техническим состоянием ГПА за счет учета показателей надежности, непрерывного анализа фактического технического состояния и его прогнозирования.

3. В настоящей статье не рассматривался порядок и методы поиска неисправностей. Данный вопрос будет рассмотрен в будущих работах.

4. Предложенный алгоритм может стать основой для совершенствования стратегии ремонтов ГПА по фактическому техническому состоянию.

Библиографический список

1. *Zayniev A. V., Shaydullin V. F., Khakimyanov M. I.* Development and Comparison of Methods for Predicting the Technical Condition of Alternators Powered By Gas Piston Engines Based on the Analysis of an Array of Historical Data // 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2024. P. 822–826. DOI: 10.1109/UralCon62137.2024.10718931.

2. ГОСТ 20911-89 «Государственный стандарт Союза ССР. Техническая диагностика. Термины и определения» (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 26.12.1989 № 4143).

3. *Дунаев А. М.* Процедура построения оптимального логического алгоритма диагностирования // Вестник Иркутского гос. тех. ун-та. 2018. Т. 22. № 9. С. 82–90. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-82-90.

4. *Мозгалевский А. В., Калявин В. П.* Системы диагностирования судового оборудования. Л.: Судостроение, 1987. 224 с.

5. *Фандеев В. П., Волков В. С., Баринов И. Н.* Модели, методы и алгоритмы оптимизации диагностирования микромеханических датчиков. Пенза: Изд-во ПТУ, 2013. 56 с.

6. Введение в техническую диагностику / Г. Ф. Верзаков [и др.]; под общ. ред. К. Б. Карандеева. М.: Энергия, 1968. 224 с.

7. Simultaneous-Fault Diagnosis of Gas Turbine Generator Systems Using a Pairwise-Coupled Probabilistic Classifier / Yang Zhixin [et al.] // Mathematical Problems in Engineering Research Article (14 pages). Article ID 827128. 2013. P. 50–64.

8. *Кравченко Д. А., Финаев В. И.* Проблемы диагностики сложных нефтегазохимических комплексов // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4. URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5298 (дата обращения: 16.12.2024).

9. *Бушуева М. Е., Беляков В. В.* Диагностика сложных технических систем // Разработка радиационно стойких полупроводниковых приборов для систем связи и прецизионных измерений с использованием шумового анализа. Труды 1-го рабочего совещания по проекту НАТО SfP-973799 Semiconductors. 2001. С. 63–98.

10. *Зайниев А. В., Шайдуллин В. Ф., Хакимьянов М. И.* Определение надежности элементов газопоршневых агрегатов с синхронными генераторами методом анализа иерархий // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 4. Т. 19. С. 108–119. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-108-119.

11. ГОСТ Р 27.102-2021 «Национальный стандарт Российской Федерации. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения» (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 08.10.2021 № 1104-ст).

12. *Зайниев А. В., Шайдуллин В. Ф., Хакимьянов М. И.* Нейро-нечеткая модель оценки технического состояния газопоршневых агрегатов // Энергетические и электротехнические системы: сб. науч. тр. Магнитогорск, 2023. С. 108–117.

13. Приказ Минэнерго России от 26.07.2017 N 676 (ред. от 17.03.2020) «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей» (Зарегистрировано в Минюсте России 05.10.2017 № 48429).

УДК 69 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-315-319**

Ю. П. Кузьменко*
магистрант
С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕННОСТЬЮ

В статье рассмотрено понятие интеллектуального освещения и критерии присущие системам интеллектуального управления освещением, на основе этого создан алгоритм интеллектуального управления освещения с использованием одного датчика освещенности при его ориентации на окно помещения. Представлена математическая основа реализации алгоритма, описаны его преимущества и недостатки.
Ключевые слова: *интеллектуальное управление освещением, алгоритмы автоматизации освещения, сенсоры освещенности, энергосбережение, микроконтроллеры, датчики движения, светодиодные системы.*

Y. P. Kuzmenko*
Postgraduate
S. V. Solyonyj
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR INTELLIGENT LIGHTING CONTROL

The article delves into the concept of smart lighting and the fundamental principles underlying intelligent lighting control systems. Building upon this foundation, an algorithm has been devised for intelligent lighting management utilizing a single light sensor, with a particular focus on its application in the context of window-oriented room illumination. The mathematical underpinnings of this algorithm's implementation are elucidated, and its strengths and limitations are thoroughly explored.
Keywords: *intelligent lighting control, lighting automation algorithms, light sensors, energy saving, microcontrollers, motion sensors, LED systems.*

Введение

В современных условиях стремительного развития технологий автоматизации и умных систем управления особое внимание уделяется эффективному освещению в различных сферах жизни. Интеллектуальные системы управления освещенностью находят широкое применение как в коммерческих, так и в жилых помещениях, способствуя снижению энергопотребления, повышению комфорта и улучшению экологической обстановки. Современные решения в этой области активно интегрируют сенсорные технологии, интернет вещей (IoT) и алгоритмы машинного обучения, что позволяет создавать адаптивные системы, способные самостоятельно регулировать уровень освещения в зависимости от внешних и внутренних факторов. Примеры успешного применения таких систем можно наблюдать в офисных зданиях, умных домах, учреждениях образования и здравоохранения, а также в уличном освещении городов. Несмотря на значительные достижения, актуальной остается задача разработки более эффективных и адаптивных алгоритмов, способных учитывать разнообразные параметры и условия эксплуатации, что открывает новые перспективы для дальнейших исследований и внедрения интеллектуальных решений в области управления освещенностью [1].

С развитием технологий появляются интеллектуальные системы управления освещением, которые интегрируют сенсоры и алгоритмы машинного обучения для оптимизации использования энергии. Эти системы способны автоматически регулировать уровень освещенности в зависимости от присутствия людей, естественного освещения, времени суток и других факторов, обеспечивая высокий уровень комфорта и значительную экономию электроэнергии. Опыт внедрения таких решений демонстрирует их эффективность в различных сфе-

рах: от умных домов и офисов до промышленных предприятий и городского освещения.

Современные достижения в области разработки алгоритмов интеллектуального управления освещенностью открывают новые возможности для повышения функциональности и надежности систем освещения. Использование адаптивных подходов позволяет не только снизить энергозатраты, но и улучшить качество жизни пользователей за счет создания комфортной и безопасной среды. Таким образом, разработка совершенных алгоритмов управления освещенностью становится важным направлением исследований, способствующим продвижению энергоэффективных и устойчивых технологий в будущем [2].

Понятие интеллектуального освещения

Интеллектуальное освещение представляет собой систему освещения, которая оснащена современными технологиями и средствами автоматизации, позволяющими ей самостоятельно регулировать параметры освещения в зависимости от различных факторов. Такие системы используют датчики, алгоритмы обработки информации и средства связи для обеспечения оптимального уровня освещенности, снижения энергопотребления и повышения комфорта пользователей. Интеллектуальное освещение может адаптироваться к изменениям внешней среды, присутствия людей, времени суток и другим условиям, обеспечивая эффективное и рациональное использование ресурсов.

Критерии интеллектуальности систем освещения

Интеллектуальность систем освещения проявляется в их способности адаптироваться к динамическим изменениям окружающей среды и индивидуальным потребностям пользователей, обеспечивая оптимальные условия освещения с учетом энергоэффективности и комфорта. Одним из ключевых признаков такой системы является автоматизированная регулировка интенсивности светового потока и спектрального состава излучения в зависимости от времени суток и уровня естественной освещенности. Например, в утренние часы система может повышать цветовую температуру света, продуцируя холодное белое излучение, стимулирующее активность и концентрацию внимания за счет повышения уровня кортизола в организме. В вечернее время система, напротив, снижает цветовую температуру, испуская теплое мягкое свечение, которое способствует выработке мелатонина и подготовке организма ко сну [3].

Дополнительной характеристикой интеллектуальной системы является интеграция сенсорных модулей присутствия и движения на основе инфракрасных датчиков или технологий машинного зрения. При обнаружении присутствия человека в помещении система автоматически активирует освещение, а при отсутствии движения в течение заданного временного интервала – деактивирует его. Это повышает уровень комфорта, устраняя необходимость ручного управления, и оптимизирует энергопотребление путем предотвращения избыточного использования электроэнергии в незанятых пространствах.

Интеграция с мобильными устройствами и системами голосового управления посредством технологий искусственного интеллекта и интернета вещей (IoT) также свидетельствует об интеллектуальности системы освещения. Пользователи могут взаимодействовать с системой через специализированные приложения или с помощью голосовых команд, реализуя персонализированные сценарии управления освещением. Например, активация «режима просмотра кинофильма» может автоматически настроить параметры освещения, снижая яркость и изменяя цветовую палитру для создания оптимальной атмосферы визуального восприятия.

Способность системы к самообучению и адаптивному управлению на основе алгоритмов машинного обучения и анализа больших данных является еще одним важным аспектом интеллектуальности. Система освещения может накапливать исторические данные о предпочтениях и поведенческих моделях пользователей, оптимизируя настройки освещения в реальном времени. Например, если пользователь регулярно включает определенный уровень яркости в конкретное время, система будет предиктивно применять эти настройки, повышая эффективность взаимодействия и пользовательский опыт [4].

Энергосберегающие функции, такие как автоматическое регулирование освещенности на основе данных с фотометрических сенсоров и адаптивное управление нагрузкой в зависимости от текущего состояния энергосистемы, также характеризуют интеллектуальную систему. Это позволяет не только снизить эксплуатационные расходы и энергопотребление, но и уменьшить нагрузку на электросети, способствуя устойчивому развитию и экологической безопасности.

В завершение, подключение интеллектуальных систем освещения к другим киберфизиче-

ским компонентам «умного дома» посредством стандартизированных коммуникационных протоколов и платформ управления подчеркивает их высокий уровень интеллектуальности. Умное освещение способно взаимодействовать с системами безопасности, климат-контроля и другими интеллектуальными устройствами, создавая единую экосистему для управления жилым пространством.

Интеграция с системами мониторинга энергопотребления позволяет оптимизировать использование освещения, снижая затраты на электроэнергию и минимизируя воздействие на окружающую среду. Умные светильники могут автоматически выключаться при отсутствии движения в помещении, регулировать яркость в зависимости от уровня естественного освещения или использовать энергоэффективные технологии, такие как LED, для снижения общего потребления энергии.

При интеграции с системами безопасности умные светильники автоматически переключаются в режим предупреждения, изменяя цветовую индикацию или режим работы, чтобы привлечь внимание и информировать пользователей о потенциальной угрозе [5].

Оптимизационные алгоритмы управления освещением

Создание алгоритмов управления освещением осложняется неравномерным распределением светового потока от отдельных осветительных приборов. В результате изменения уровня управляющего сигнала для конкретного рабочего места достижение необходимой освещенности на одном месте не гарантирует соблюдение нормируемых показателей на других рабочих местах [6].

Для реализации эффективной системы освещения необходимо внедрение оптимизационной функции $opt(P_{kj})$, которая учитывает множество значений P_{kj}, где k обозначает номер рабочего места, а j – номер светильника. Такая функция способна оптимизировать параметры и выбирать уровень управляющего сигнала для поддержания освещенности на каждом конкретном рабочем месте (k-ом). Использование данной функции оптимизации позволяет привести систему к соблюдению требований стандартов по освещенности, при этом стремясь к снижению общей освещенности для уменьшения потребления электроэнергии системой освещения. Дополнительно, чтобы избежать работы освещения в периоды отсутствия людей в помещении, можно добавить дополнительный коммутационный прибор для ручного выключения персоналом ОУ(осветительных установок) [7].

Алгоритм управления при установке датчика внутри помещения с ориентацией его на окно

Спроектированный алгоритм представлен на рис. 1. Данный алгоритм реализует управле-

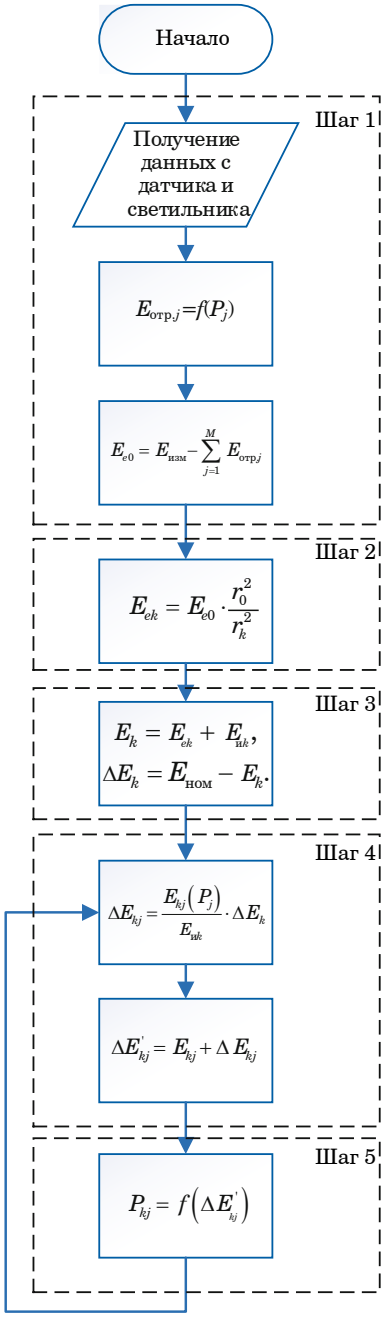


Рис. 1. Алгоритм управления освещенностью на основе одного датчика освещенности

ние осветительной установкой по 5 шагам, описание каждого шага будет происходить далее.

С целью реализации данного метода управления освещением, необходимо разместить фотоследящее устройство так, чтобы его чувствительная часть была ориентирована на окно помещения. При этом необходимо учесть, что при таком размещении датчика освещение, установленное в помещении, также будет оказывать воздействие на датчик освещенности, внося ошибку при управлении освещением.

Для нивелирования данной ошибки, в алгоритм требуется внести поправку, которая будет отображать следующую зависимость $E_{\text{отр},j}=f(P_j)$. Данная зависимость позволит системе учитывать отраженную освещенность от остекления помещения, алгоритм применит данную зависимость к каждой осветительной установке и из полученной датчиком величины $E_{\text{изм}}$. Контроллер получит освещенность естественным светом E_{e0} в точке, осматриваемой датчиком:

$$E_{e0} = E_{\text{изм}} - \sum_{j=1}^{M} E_{\text{отр}.j}.$$

Место установки датчика определяется так, чтобы на расстоянии установки датчика от окна не находились осветительные устройства.

Управление освещением реализуется по следующей методике: до получения сигнала от устройства управления (выключателя или датчика движения) система находится в ожидании. После этого электрический ток подается к осветительной установке, переводя систему в рабочий режим.

Шаг 1 согласно рис. 1:

Следящее устройство отправляет результат измеренной освещенности $E_{\text{изм}}$. Получив такой P_j сигнал, система управления обрабатывает данные текущего значения управляющего сигнала от всех элементов системы.

Шаг 2 согласно рис. 1:

По полученным данным P_j система определяет $E_{\text{отр},j}=f(P_j)$ и затем рассчитывает E_{e0}.

В результате работы контроллер формирует очередь на параллельное вычисление двух параметров:

– уровня естественной освещенности E_{ek} на каждом рабочем месте:

$$E_{ek} = E_{e0} \cdot \frac{r_0^2}{r_k^2}$$

– суммарного уровня освещенности от искусственного освещения на k-м рабочем месте $E_{\text{и}k}$ на основе полученных по P_j уровням освещенности каждого j-й ОУ $E_{kj}=f(P_j)$

Шаг 3 согласно рис. 1:

После получения результата вычисления на прошлом шаге, оба результата складываются, на основе расчета контроллер получает значение ΔE_k. Значение данного параметра компенсируется системой управления. Таким управления уровнем освещения от осветительной установки.

$$E_k = E_{ek} + E_{\text{и}k},$$
$$\Delta E_k = E_{\text{ном}} - E_k.$$

Шаг 4 согласно рис. 1:

Для выполнения данного шага контроллер освещения определяет необходимый сигнал P_{kj} для каждого конкретного светильника, причем учитывая местоположение светильника, для полной компенсации параметра ΔE_k.

$$\begin{cases} \Delta E_{kj} = \dfrac{E_{kj}\left(P_j\right)}{E_{\text{и}k}} \cdot \Delta E_k \\ \Delta E'_{kj} = E_{kj} + \Delta E_{kj} \end{cases}.$$

Шаг 5 согласно рис. 1:

После получения результата выполнения предыдущего шага, система получает значение P_{kj}, к которому применяется имеющаяся функция оптимизации. На основе выполненной операции контроллером определяется необходимое значение сигнала управления P_j, после чего данное значение отправляется в осветительный прибор.

$$P_{kj} = f\left(\Delta E'_{kj}\right).$$

На этом работа данной системы переходит в циклический режим, и система ожидает нового сигнала от управляющего устройства.

При попытке совместить датчик положения (ДП) и фотосенсорный элемент возникают конструктивные осложнения, обусловленные различиями в их принципах функционирования. Более того, загрязнение окон может привести к некорректной работе системы управления, поскольку изменяется доля отраженного светового потока, однако этот фактор оказывает меньшее влияние по сравнению с первым методом. Тем не менее, необходимо также учитывать согласование положения жалюзи [8]. При размещении фотосенсорного элемента внутри помещения стоимость датчика существенно снижается, нет необходимости в контроле электроники, и датчик можно установить на любом этаже,

при этом риск вандализма внутри помещения во время эксплуатации минимален.

Выводы

Развитие алгоритмов интеллектуального управления освещенностью открывает перед нами новые горизонты в области энергоэффективности и комфорта жизни. Современные системы, интегрирующие передовые технологии сенсорики, интернета вещей и искусственного интеллекта, демонстрируют значительный потенциал для оптимизации использования энергии и адаптации к изменяющимся потребностям пользователей. Опыт внедрения таких решений в различных сферах – от жилых помещений до промышленных объектов и городского пространства – подтверждает их эффективность и надежность.

Будущее систем освещения неизменно связано с развитием умных технологий. Интеллектуальные системы управления освещенностью не только способствуют снижению энергетических затрат, но и улучшают качество жизни, создавая комфортную и безопасную среду. Адаптивные алгоритмы способны учитывать множество факторов одновременно, обеспечивая максимальную производительность и удовлетворение потребностей пользователей в реальном времени.

Таким образом, перспективы развития интеллектуальных систем освещения выглядят многообещающими. Интеграция новых технологических решений и постоянное совершенствование алгоритмов управления позволят создавать более эффективные, устойчивые и удобные в использовании системы. Будущее за умными системами, которые становятся неотъемлемой частью современного общества, способствуя устойчивому развитию и повышению качества жизни.

По сути, усовершенствованный алгоритм интеллектуального управления освещением представляет собой перспективное решение для оптимизации энергопотребления и обеспечения комфортных условий освещения. Теоретический анализ подтверждает способность системы адаптироваться к различным внешним факторам и индивидуальным предпочтениям пользователя.

Применение разработанного алгоритма управления светодиодным освещением позволяет повысить эффективность работы осветительной установки и позволяет более гибко настраивать освещенность в соответствии с биологическими показателями человека, а также для более лучшего соблюдения требований нормативной документации в части освещенности рабочих мест. Использование такого алгоритма позволяет существенно снизить капиталовложения в проектируемую систему за счет использования датчика освещенности с низким показателем защищенности от внешнего воздействия.

Библиографический список

1. *Кузьменко В. П.* Модели и методики обеспечения качества светодиодных осветительных приборов: дис. канд. тех. наук. М., 2021.

2. Модели и методики обеспечения качества светодиодных осветительных приборов. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obrazovatelnaya-svetovaya-sreda-professionalnogo-uchebnogo-zavedeniya (дата обращения: 20.02.2023).

3. Новая технология электропитания светодиодов – новый уровень «умного освещения». URL: http://lightingmedia.ru/wp-content/uploads/2020/11/32.pdf (дата обращения: 20.02.2023).

4. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. М.: Энергоатомиздат, 1995. 972 с.

5. Энергосбережение в освещении / Под ред. проф. Ю. Б. Айзенберга. М.: Знак, 1999. 264 с.

6. *Соловьёв А. К.* Распределение яркости по небосводу и его учет при проектировании естественного освещения зданий // Светотехника. 2008. № 6. С. 18–27.

7. *Коржнева Т. Г.* Исследование эффективности совмещенного освещения с учетом энергетического баланса помещения: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.03. Томск, 2015. 110 с.: ил.

8. *Вернер В.* Интеллектуальные системы управления внутренним освещением // Светотехника. 1993. № 4. С. 15–19.

УДК 621.316.965 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-320-325**

А. А. Мартынов*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ КОММУТАЦИИ ВЫПРЯМИТЕЛЯ НА ПЕРЕХОДНЫЕ И УСТАНОВИВШИЕСЯ РЕЖИМЫ ЕГО РАБОТЫ

Рассмотрены вопросы влияния коммутационных процессов выпрямителя при питании его от трансформатора с расщепленной вторичной обмоткой на переходные и установившиеся режимы работы выпрямителя.
Ключевые слова: *трансформатор, выпрямитель, диоды, короткое замыкание, ток, напряжение, коммутационный процесс.*

A. A. Martynov*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

CONSIDERATION OF THE INFLUENCE OF RECTIFIER SWITCHING PROCESSES ON TRANSIENT AND STEADY-STATE MODES OF ITS OPERATION

The issues of influence of rectifier switching processes when it is powered from a transformer with a split secondary winding on transient and steady-state modes of rectifier operation are considered.
Keywords: *transformer, rectifier, diodes, short circuit, current, voltage, switching process.*

Введение

Преобразователи частоты со звеном постоянного тока находят широкое применение в асинхронных электроприводах различного назначения, включая тяговые электроприводы и электроприводы гребных винтов. В частотно-управляемом электроприводе, выполненном по схеме со звеном постоянного тока, иногда возникают аварийные ситуации, вызванные пробоем диодов выпрямителей, диода и транзистора чопера, предназначенного для сброса энергии, накопленной конденсатором фильтра за время работе асинхронного двигателя в генераторном режиме (рис. 1). На характер установившихся и переходных процессов трансформатора при замыкании цепи постоянного тока выпрямителя существенное влияние оказывают коммутационные процессы выпрямителя [1–5].

Коммутация тока с вентиля на вентиль выпрямителя осуществляется за счет спада волны фазного напряжения [1]. Практически такой процесс осуществляется в течение конечного интервала времени, выражаемого в угловых единицах через γ. Угол γ принято называть углом коммутации. Причиной возникновения коммутационных процессов является наличие в фазных цепях на входе выпрямителя индуктивных сопротивлений $x_{ф}$, обусловленных индуктивностями рассеяния обмоток трансформатора $L_{ф}$, индуктивностями кабелей линии передачи, индуктивностями генераторов питающей сети.

Физическая сущность коммутационных процессов в выпрямителе

Рассмотрим процесс коммутации в трехфазном мостовом выпрямителе (рис. 2). На схеме показаны индуктивности рассеяния обмоток трансформатора и генератора переменного тока, приведенные к вторичной обмотке трансформатора. При открытии вентиля $V3$ в контуре фаз a и b в течение угла коммутации γ одновременно в катодной группе работают вентили $V1$, $V3$. Для упрощения рассмотрения коммутационных процессов пренебрежем падением напряжения на открытых диодах и на активном сопротивлении обмоток трансформатора, т. е. примем их равными нулю.

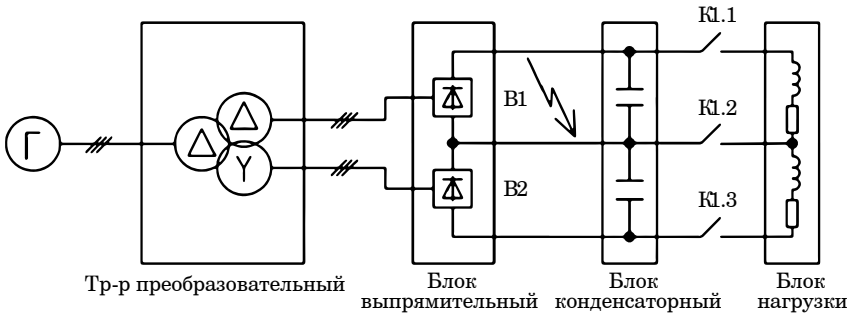


Рис. 1. Структурная схема звена постоянного тока преобразователя частоты электропривода гребного винта

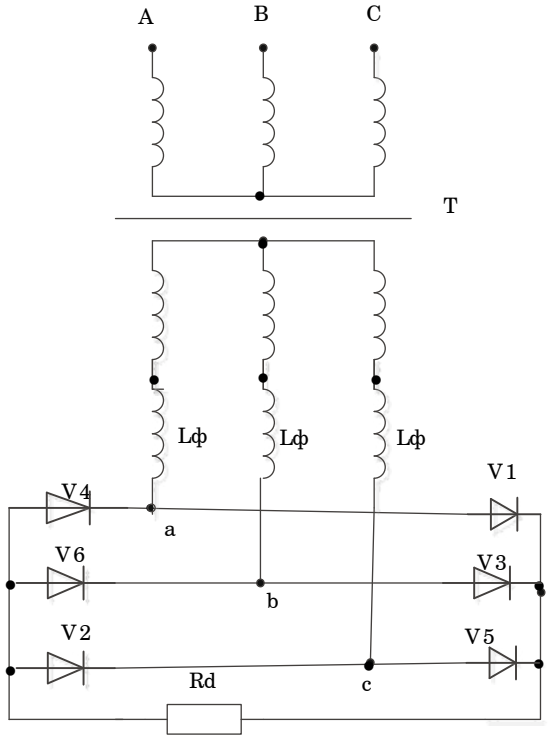


Рис. 2. Схема трехфазного мостового выпрямителя

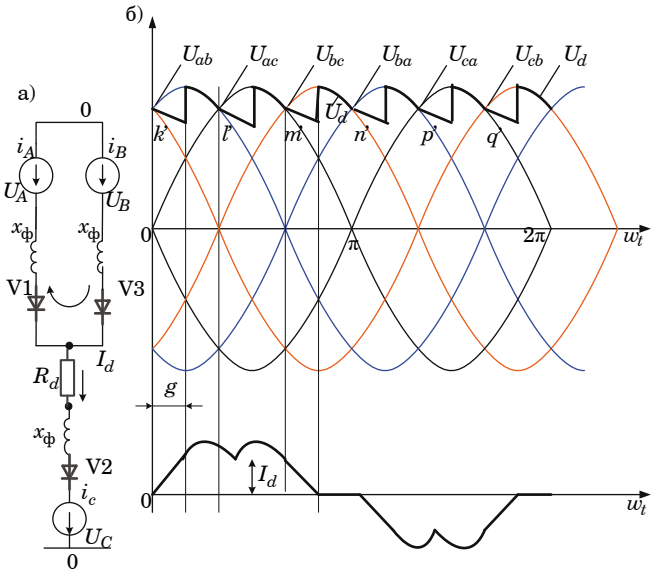


Рис. 3. Схема замещения выпрямителя на интервале коммутации (а) и временные диаграммы, поясняющие коммутационный процесс; (б)

Образованный в процессе коммутации короткозамкнутый контур представлен на рис. 3, *а*. Временные диаграммы напряжений и токов неуправляемого выпрямителя при $\gamma=\pi/6$ представлены на рис. 3, *б*.

Приведем уравнение равновесия напряжения для контура коммутации [6]:

$$L_ф \frac{di_a}{dt} - L_ф \frac{di_в}{dt} = E_a - E_в = U_{ав}. \qquad (1)$$

Решая это уравнение, получим выражение для расчета величины угла коммутации γ для неуправляемого выпрямителя:

$$\gamma = \arccos\left[1 - \frac{2x_ф}{\sqrt{2}U_{2л}} \cdot I_d\right]. \qquad (2)$$

Анализируя выражение (2), можно установить, что угол коммутации γ возрастает при увеличении индуктивного сопротивления рассеяния обмоток трансформатора $x_ф$ и тока нагрузки I_d, а увеличение напряжения переменного тока U_2 приводит к уменьшению угла коммутации γ.

Влияние угла коммутации на параметры режимы короткого замыкания выпрямителя

При работе неуправляемого выпрямителя на активную нагрузку (L_d=0) и изменении тока цепи постоянного тока в пределах от 0 до тока глухого короткого замыкания $I_{dк}$ выделяют 3 режима [3]. Режим I характеризуется изменением угла коммутации γ от 0 до 60°. На интервале режима II угол коммутации γ=60°=const.

Однако начало очередного процесса коммутации начнет задерживаться на некоторый отрезок времени аналогично тому, как это происходит в управляемом выпрямители при задержке импульса управления. Поэтому эту задержку включения очередного диода в работу принято называть фактическим углом регулирования и обозначать его как α'. На интервале режима II фактический угол регулирования α' изменяется от 0 до 30°. Совершенно очевидно, что фактический угол регулирования оказывает влияние на величину выпрямленного напряжения аналогично тому, как угол регулирования α в управляемом выпрямителе влияет на величину выходного напряжения.

На рис. 4 приведены два графика, иллюстрирующие зависимость угла коммутации γ и фактического угла регулирования α' от относительного параметра тока I_d^*, при отсутствии индуктивности в цепи постоянного тока (L_d=0), для трех режимов работы выпрямителя. По оси абсцисс отложены относительные значения постоянного тока $I_d^*=I_d/I_{dкm}$, где $I_{dкm}=\sqrt{2}U_{2ф}/x_ф$ – максимальное значение тока короткого замыкания. По оси ординат отложены значения углов коммутации γ и фактического угла α'.

Границу между режимами I и II можно определить, воспользовавшись формулой (2), положив значение угла коммутации γ = 60°:

$$1-\frac{2x_ф}{\sqrt{2}U_{2л}}\cdot I_d=0{,}5.$$

Следовательно, переход от режима I в режим II происходит при токе I_d*=0,5.

На интервале режима II угол коммутации γ остается неизменным и равным 60°, а фактический угол регулирования α' изменяется от 0 до 30°.

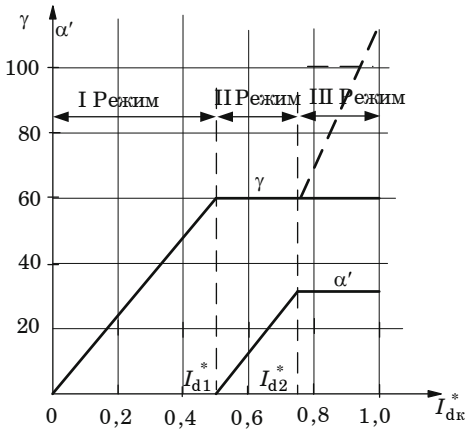


Рис. 4. Зависимости угла коммутации и фактического угла регулирования от тока цепи постоянного тока трехфазного мостового выпрямителя

В режиме III ток I_d^* изменяется в пределах $I_{d2}^* < I_d^* < I_{d\,к.з}^*$, дополнительный угол регулирования α' остается неизменным и равным 30° [1]. В режиме III угол коммутации γ увеличивается от γ =60° до γ =120° [3]. График зависимости $\gamma=f(I_{d\,к.з}^*)$ для режима III показан на рис. 4 пунктиром. Граничное значение тока режима III является током глухого короткого замыкания $I_{d\,к.з}^*$. Поскольку угол коммутации влияет на величину и форму тока диода и фазы вторичной обмотки, необходимо уточнить зависимость $\gamma=f(I_{d\,к.з}^*)$ в режиме короткого замыкания.

Определим внешнюю характеристику неуправляемого выпрямителя для режима III и определим параметры глухого короткого замыкания. В режиме III одновременно работают 3 диода и коммутационные процессы не прерываются.

Мгновенное значение напряжения на выходе выпрямителя для режима III определяется как разность напряжений фазы, не участвующей в коммутации, например, фаза *a*, и напряжения, определяемого как полусумма напряжений двух других фаз, фазы *в* и фазы *с*, участвующих в коммутации. Обозначим это напряжение как $u_{л2к.}$ Именно это напряжение и прикладывается к нагрузке на интервале режима III:

$$u_{л2к}=u_a-\left(u_в+u_c\right)/2. \qquad (3)$$

С учетом того, что сумма мгновенных значений напряжения трехфазной системы равна 0, сумма $(u_в+u_c)=-u_a$, а $(u_в+u_c)/2=-u_a/2$. Таким образом, при работе выпрямителя в режиме III, включая и режим глухого короткого замыкания, мгновенное значение линейного напряжения изменяется в фазе с напряжением u_a, а амплитудное значение этого напряжения равно $1{,}5U_{2ф}$*m*:

$$u_{л2к}=u_a-\left(u_в+u_c\right)/2=1{,}5\sqrt{2}U_{2ф}\sin\omega t. \qquad (4)$$

С учетом (4) среднее значение выпрямленного напряжения можно определить по формуле (5):

$$U_{d0}=\frac{3}{\pi}\int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}}\frac{3\sqrt{2}}{2}U_{2Ф}\sin\omega t\,\mathrm{d}\omega t=$$

$$=\frac{9\sqrt{2}}{2\pi}U_{2Ф}[-\cos(\frac{2\pi}{3})+\cos(\frac{\pi}{3})]=$$

$$=\frac{9\sqrt{2}}{2\pi}U_{2Ф}[-2\sin\frac{\pi}{2}\sin(-\frac{\pi}{6})=\frac{9\sqrt{2}}{2\pi}U_{2Ф}. \qquad (5)$$

При значении фактического угла регулирования $\alpha'>0$ выпрямленное напряжение уменьшается на величину, равную $\Delta U_{d\alpha}= U_{d0}(1-\cos\alpha')$.

При пренебрежении активным сопротивлением обмоток трансформатора расчет величины напряжения нагрузки выпрямителя можно определить по формуле (6):

$$U_{d\alpha} = U_{d0} - \Delta U_{dx} = U_{d0} - U_{d0}\left(1-\cos\alpha'\right) - U_{d0}\left[\cos\alpha' - \cos\left(\alpha'-\gamma\right)\right]/2,$$

где $\Delta U_{dx} = U_{d0}\left[\cos\alpha' - \cos\left(\alpha'-\gamma\right)\right]/2$ – падение напряжения, вызванное коммутацией;

$$U_{d\alpha} = U_{d0} - \Delta U_{d\alpha} - \Delta U_{dx} = U_{d0} - U_{d0}\left(1-\cos\alpha'\right) - U_{d0}\left[\cos\alpha' - \cos\left(\alpha'-\gamma\right)\right]/2 = U_{d0}\cdot\cos\alpha' - U_{d0}\frac{2x_{\text{ф}}}{\sqrt{6}U_{2\text{ф}}}\cdot I_d. \quad (6)$$

При коротком замыкании $U_{d\alpha}=0$ и $\alpha'=30^{\text{o}}$ ток короткого замыкания:

$$I_{\text{dk}} = \cos\alpha'\cdot\sqrt{6}\cdot 3\cdot U_{2\text{ф}}/\left(2\pi x_{\text{ф}}\right) = 9\sqrt{2}\cdot U_{2\text{ф}}/\left(4\pi x_{\text{ф}}\right) = 0{,}75\cdot 0{,}955\cdot I_{dkm};$$

$$\cos\alpha - \cos(\alpha - \tilde{a}) = \frac{2x_{\hat{O}}}{\sqrt{6}U_{2\Phi}}I_d.$$

Применительно к общему случаю простых однотактных и двухтактных схем выпрямления уравнение, определяющее падение напряжения, вызванное коммутацией, приобретает вид:

$$\Delta U_{dx} = \frac{k_{\text{т}}m_2}{2\pi}\cdot x_{\text{ф}} I_d, \quad (7)$$

или

$$\Delta U_{dx} = X_{\text{к}} I_d.$$

В общем виде для любой схемы выпрямления параметр фиктивное сопротивление $X_{\text{к}}$ можно определить по формуле:

$$X_k = \frac{k_{\text{т}}m_2}{2\pi}\cdot x_{\text{ф}}. \quad (8)$$

Определим ток короткого замыкания с учетом того, что при глухом коротком замыкании напряжение $U_{d\text{к}}=I_{d\text{к}}x_{\text{к.з}}$.

Величину сопротивления цепи короткого замыкания трехфазного мостового выпрямителя $x_{\text{к.з}}$ можно определить, воспользовавшись схемой замещения трехфазного мостового выпрямителя на интервале коммутации, приведенной на рис. 2, *а*. По схеме можно определить, что $x_{\text{к.з}}=1{,}5x_{\text{ф}}$. С учетом этого среднее значение тока короткого замыкания трехфазного мостового выпрямителя можно определить по формуле (9):

$$I_{dk} = U_{d0}/x_{\text{к.з}} = \left[9/(2\pi)\right]\sqrt{2}U_{2\text{ф}}/\left(1{,}5x_{\text{ф}}\right) = \left(3/\pi\right)\cdot\sqrt{2}U_{2\text{ф}}/x_{\text{ф}} = 0{,}955 I_{dkm}, \quad (9)$$

где $I_{dk\text{m}} = \sqrt{2}U_{2\text{ф}}/x_{\text{ф}}$ – максимальное амплитудное значение тока короткого замыкания, определяемое при условии $L_d=0$, наличии угла коммутации $\gamma=60^{\text{o}}$ и угле $\alpha'=0^{\text{o}}$. Очевидно, что амплитудное значение тока вентиля:

$$I_{\text{в.m}} = I_{dk\text{m}} = \sqrt{2}U_{2\text{ф}}/x_{\text{ф}}. \quad (10)$$

Из формулы (9) можно определить среднее значение тока диода выпрямителя:

$$I_{\text{в.ср}} = I_{dk}/3 = \sqrt{2}U_{2\text{ф}}/\left(\pi x_{\text{ф}}\right) = I_{dk\text{m}}/\pi. \quad (11)$$

Действующее значение тока фазы вторичной обмотки трансформатора:

$$I_2 = U_{2\text{ф}}/x_{\text{ф}}. \quad (12)$$

Из (10)–(12) следует, что при глухом коротком замыкании цепи постоянного тока выпрямителя (и угле коммутации $\gamma=60^{\text{o}}$) расчеты тока фазы, диодов могут быть проведены по формулам, аналогичным для режима короткого замыкания отдельной фазы. Это утверждение согласуется с положением ГОСТ 29176-91 в части методики расчета тока короткого замыкания [7]. Для расчета токов I_2, $I_{\text{в.ср}}$, $I_{\text{в.}m}$ и $I_{\text{в.}m}$ необходимо определить значение индуктивного сопротивления рассеяния фазы $x_{\text{ф}}$. Для двухобмоточного трансформатора $x_{\text{ф}}$ является индуктивным сопротивлением рассеяния обмоток одной фазы трансформатора, приведенное к вторичной стороне. Для трансформатора с расщепленной обмоткой при расчете $x_{\text{ф}}$ необходимо также учитывать и взаимную индуктивность вторичных обмоток.

Учет влияния расщепления вторичных обмоток на величину индуктивного сопротивления рассеяния трансформатора

На рис. 1 приведена структурная схема преобразователя частоты электропривода гребно-

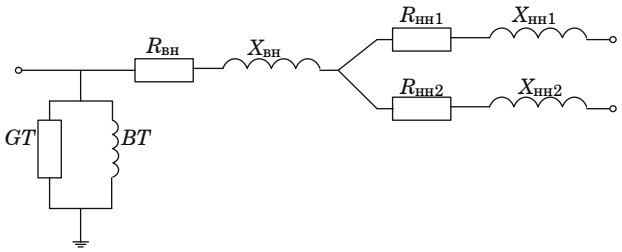


Рис. 5. Схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой

го винта, в которой трансформатор выполнен с расщепленной вторичной обмоткой. Каждая вторичная обмотка трансформатора подключена к трехфазному мостовому выпрямителю. Схема замещения трансформаторов с расщепленной обмоткой имеет вид трехлучевой звезды [8] приведена на рис. 5.

Для трансформатора с расщепленной обмоткой заданными параметрами обычно являются коэффициент трансформации $k_{тр}$, напряжение сквозного короткого замыкания $U_{к.скв}$, напряжение частичного короткого замыкания $U_{к.ч}$, мощность потерь при сквозном коротком замыкании $P_{к.скв}$ и при частичном коротком замыкании $P_{к.ч}$.

Эти параметры позволяют приближенно определить сопротивления рассеяния и активные сопротивления обмоток трансформатора, необходимые для расчета характеристик трансформатора и преобразователя частоты.

Режимам сквозного и частичного короткого замыкания трансформатора соответствует система уравнений (13):

$$\left.\begin{aligned} U_{к.скв} &= I_{1N}\left(X_1 + 0{,}5X_2\right) \\ U_{к.ч} &= I_{1N}\left(X_1 + X_2\right) \end{aligned}\right\}. \qquad (13)$$

где X_1 и X_2 – эквивалентные индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток трансформатора, приведенные к первичной обмотке, соответственно.

Таким образом, при известных значениях напряжений короткого замыкания $U_{к.скв}$ и $U_{к.ч}$, можно определить эквивалентные индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичных обмоток X_1 и X_2 трансформатора с расщепленной обмоткой:

$$X_1 = \frac{2U_{к.скв} - U_{к.ч}}{I_{1N}};$$
$$X_2 = 2\frac{U_{к.ч} - U_{к.скв}}{I_{1N}}. \qquad (14)$$

Индуктивное сопротивление сквозного короткого замыкания:

$$U_{к.скв} = X_1 + 0{,}5X_2. \qquad (15)$$

Индуктивное сопротивление частичного короткого замыкания:

$$U_{к.ч} = X_1 + X_2. \qquad (16)$$

Индуктивное сопротивление расщепления короткого замыкания:

$$X_р = 2X_2. \qquad (17)$$

Коэффициент расщепления $K_р$:

$$K_p = X_p / X_{к.скв} = 2X_2 / X_{к.скв}. \qquad (18)$$

Для определения активных сопротивлений обмоток схемы замещения может быть составлена система уравнений (19):

$$\left.\begin{aligned} P_{скв} &= 3I_{1н}^2 R_1 + 1{,}5I_{1н}^2 R_2 \\ P_{ч} &= 3I_{1н}^2\left(R_1 + R_2\right) \end{aligned}\right\}. \qquad (19)$$

Используя систему уравнений (19), найдем расчетные соотношения для активных сопротивлений первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$R_1 = \frac{2P_{скв} - P_{ч}}{3I_{1н}^2}, \quad R_2 = 2\frac{P_{ч} - P_{скв}}{3I_{1н}^2}. \qquad (20)$$

Активное сопротивление частичного короткого замыкания составляет:

$$R_{к.ч} = R_1 + R_2. \qquad (21)$$

Полученные значения параметров схемы замещения трансформатора с расщепленной обмоткой позволяют рассчитать как установившиеся, так и переходные значения токов глухого короткого замыкания цепи постоянного тока преобразователя частоты [8, 9].

Полное сопротивление частичного короткого замыкания, приведенное к первичной обмотке:

$$Z_к = \sqrt{X_к^2 + R_к^2}.$$

Полное сопротивление частичного короткого замыкания, приведенное к вторичной обмотке $Z'_к = Z_к / k^2_{тр}$.

Амплитудное значение тока частичного короткого замыкания вторичной обмотки:

$$I_{mk} = \sqrt{2} \cdot U_{2ф} / Z'_k.$$

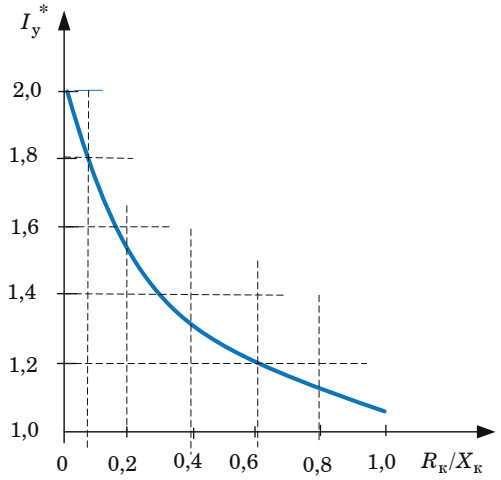


Рис. 6. Зависимость относительного значения ударного тока при глухом коротком замыкании от параметров выпрямителя

Зависимость относительного значения ударного тока короткого замыкания $I_у^* = I_у/I_{2m\,к}$ для заданного момента времени t от параметров выпрямителя можно рассчитать по формуле (22):

$$I_y^* = \sin\left(\omega t - \varphi_к\right) + \sin\varphi_к \cdot e^{\omega t \cdot ctg\varphi_к}, \qquad (22)$$

где $\varphi_к$=arcctg$R_к/X_к$ – фазовый угол при коротком замыкании; $\omega=2\pi f$ – угловая частота питающей сети.

Амплитудное значение ударного тока короткого замыкания будет иметь максимальное значение в момент времени $t=\pi/\omega$ и может быть рассчитано по формуле (23):

$$I_y^* = 1 + e^{-\pi R_к/X_к}. \qquad (23)$$

Зависимость относительного значения ударного тока короткого замыкания вторичной обмотки от параметров эквивалентной схемы выпрямителя, приведена на рис. 6. Из рис. 6 видно, что увеличение отношения $R_к/X_к$ снижает амплитудное значение ударного тока короткого замыкания.

Заключение

1. Коммутационные процессы выпрямителя оказывают существенное влияние на величину токов короткого замыкания.

2. Использование трансформатора с расщепленной вторичной обмоткой приводит к снижению величины тока короткого замыкания благодаря увеличению индуктивного сопротивления рассеяния обмоток трансформатора. Причем снижается величина как установившегося, так и переходного тока короткого замыкания.

Библиографический список

1. *Размадзе Ш. М.* Преобразовательные схемы и системы, М.: Высш. школа, 1967.

2. Судовые полупроводниковые преобразователи: учебник / В.М. Рябенький [и др.]. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, 2015. 556 с.: ил. ISBN 978-5-261-01027-2. URL: https://rucont.ru/efd/638575 (дата обращения: 23.11.2024).

3. *Лукутин Б. В., Обухов С. Г.* Силовые преобразователи в электроснабжении: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 144 с.

4. *Ривкин Г. А.* Преобразовательные устройства. М.: Энергия, 1970.

5. *Толстов Ю. Г., Мосткова Г. П., Ковалев Ф. И.* Трехфазные силовые полупроводниковые выпрямители, управляемые дросселями насыщения. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1963.

6. *Мартынов А. А.* Силовая электроника. Выпрямители и регуляторы переменного тока: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2011.

7. ГОСТ 29176-91. Короткие замыкания в электроустановках. Методика расчета в электроустановках постоянного тока.

8. Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок / Я. Р. Фишлер, Р. Н. Урманов, Л. М. Пестряева. М.: Энергоатомиздат, 1989.

9. Электроснабжение метрополитенов. Устройство, эксплуатация и проектирование / Е. И. Быков [и др.]. М.: Транспорт, 1977.

УДК 620.1 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-326-330**

М. К. Прокофьева*
аспирант
В. В. Булатов*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ ОПТИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА

В статье приведены обобщенные задачи оптического контроля для детектирования дефектов листовых материалов. Основные дефекты собраны в общие типы классификаций. Приведены примеры дефектов из каждого типа классификации.
Ключевые слова: *оптический контроль качества, листовой материал, металл, стекло, композитный материал, неразрушающие методы контроля.*

M. K. Prokofieva*
PhD Student
V. V. Bulatov*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

CLASSIFICATION OF DEFECTS IN OPTICAL INSPECTION OF SHEET MATERIAL

The article presents generalized optical control tasks for detecting defects in sheet materials. The main defects are grouped into general types of classifications. Examples of defects from each type of classification are given.
Keywords: *optical quality control, sheet material, metal, glass, composite material, non-destructive testing methods.*

Оптический контроль качества листового материала – это метод неразрушающего контроля, основанный на использовании оптических технологий для проверки поверхности и геометрических параметров листового материала на соответствие установленным требованиям. Оптический контроль качества листового материала основан на взаимодействии световых волн с поверхностью материала, что позволяет обнаруживать дефекты, измерять геометрические параметры и оценивать состояние поверхности. Основным принципом метода является использование света в различных спектральных диапазонах – от видимого до инфракрасного – для выявления изменений, которые могут свидетельствовать о наличии дефектов или отклонений от нормы.

Процесс начинается с освещения поверхности листового материала. Для этого применяются различные источники света, такие как лазеры, светодиоды или галогенные лампы. Световые волны падают на материал, и их взаимодействие с поверхностью фиксируется специальными оптическими устройствами. В зависимости от типа используемого оборудования фиксируются отраженные, рассеянные или прошедшие через материал световые сигналы. Эти сигналы содержат информацию о структуре и характеристиках поверхности.

Собранные данные передаются в системы анализа. Здесь в работу вступают камеры, линейные сканеры или сенсоры, которые преобразуют отраженный свет в цифровую информацию. Специализированное программное обеспечение интерпретирует эти данные, анализируя изображения, выявляя отклонения в текстуре, цвете, геометрии или толщине материала. Современные алгоритмы обработки изображений позволяют детально изучить каждую точку поверхности и с высокой точностью определить наличие даже самых мелких дефектов.

Важной частью метода является контроль условий освещения и настройки оборудования, чтобы исключить внешние помехи, такие как блики или тени, которые могут исказить результаты. Таким образом, оптический контроль

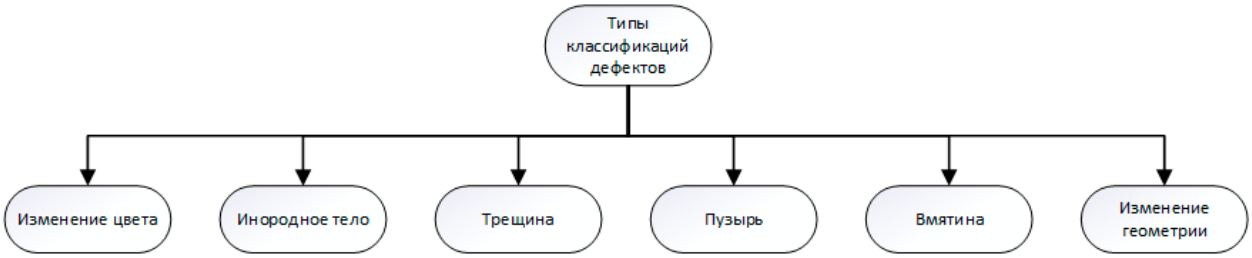


Рис. 1. Типы квалификаций дефектов

основывается на сочетании физических принципов световолнового взаимодействия и современных технологий цифровой обработки данных, что делает его одним из самых точных и универсальных методов анализа листового материала.

При неразрушающем контроле тип дефекта определяется на основе косвенных характеристик – информативных признаков. В обобщенном виде поиск информативных признаков включает в себя следующие задачи [1]:

– идентификация объектов (используется для распознавания различных типов объектов, например, для контроля потока материала или для принятия решения о том, какие проверки проводить);

– обнаружение положения (используется, например, для точного определения положения листового материала, может выполняться в двух или трех измерениях, в зависимости от требований приложения);

– проверка комплектности (обычно выполняется после завершения определенного этапа сборки продукта, например, после размещения компонентов на печатной плате, чтобы убедиться в том, что продукт собран правильно, т. е. в наличии нужных компонентов в нужном месте);

– проверка формы и размеров (применяется для проверки геометрических параметров изделия с целью подтверждения их соответствия установленным допускам);

– проверка поверхности (применяется для проверки поверхности готового изделия на наличие дефектов, таких как царапины, вмятины, выступы и другие).

Почти все из этих задач требуется решить и при контроле качества листового металла, стекла и композита. При оптическом контроле листового металла и композита возможно провести диагностику поверхности, а в стекле и контроль внутреннего состояния.

Например, об эффективности применения оптического контроля в оценке качества листового металла говорится в статье [2]. Из всех приведенных в статье методах неразрушающего контроля поверхностных дефектов, оптический показывает самые высокие баллы интегральной оценки по пятибалльной шкале.

Внедрение оптического контроля в дефектацию стекла описывается в [3], где рассматривается распознавание дефекта стекла «выщелачивание».

В статье [4] приводятся доводы и обоснования использования оптического контроля в контексте «машинного зрения» в производстве и контроле качества композитных материалов.

Рассмотрим возможные поверхностные (и внутренние для непрозрачных материалов) дефекты. Обобщенно, после изучения ГОСТ 21014-2022 «Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения» [5], ГОСТ 32361-2013 «Стекло и изделия из него. Пороки. Термины и определения» [6], ГОСТ Р 56975–2016 «Композиты полимерные. Показатели внешнего вида изделий из многослойных стеклокомпозитов» [7] можно выделить общие типы классификаций для диагностики (рис. 1), которые прослеживаются в каждом из материалов.

На рис. 2 приведены визуальные примеры некоторых дефектов листового металла, стекла и композитных материалов, которые могут быть классифицированы на базе оптических методов контроля.

В зависимости от размеров, расположения, направления и структуры дефекта происходит точное диагностирование. Примеры некоторых дефектов в табл. 1.

Данный пример распределения дефектов по классификациям означает, что возможно создать единый алгоритм и диагностическую модель для проверки и классификации пороков различных материалов. На основе алгоритма и диагностической модели можно создать систему по контролю качества с поиском и классифи-

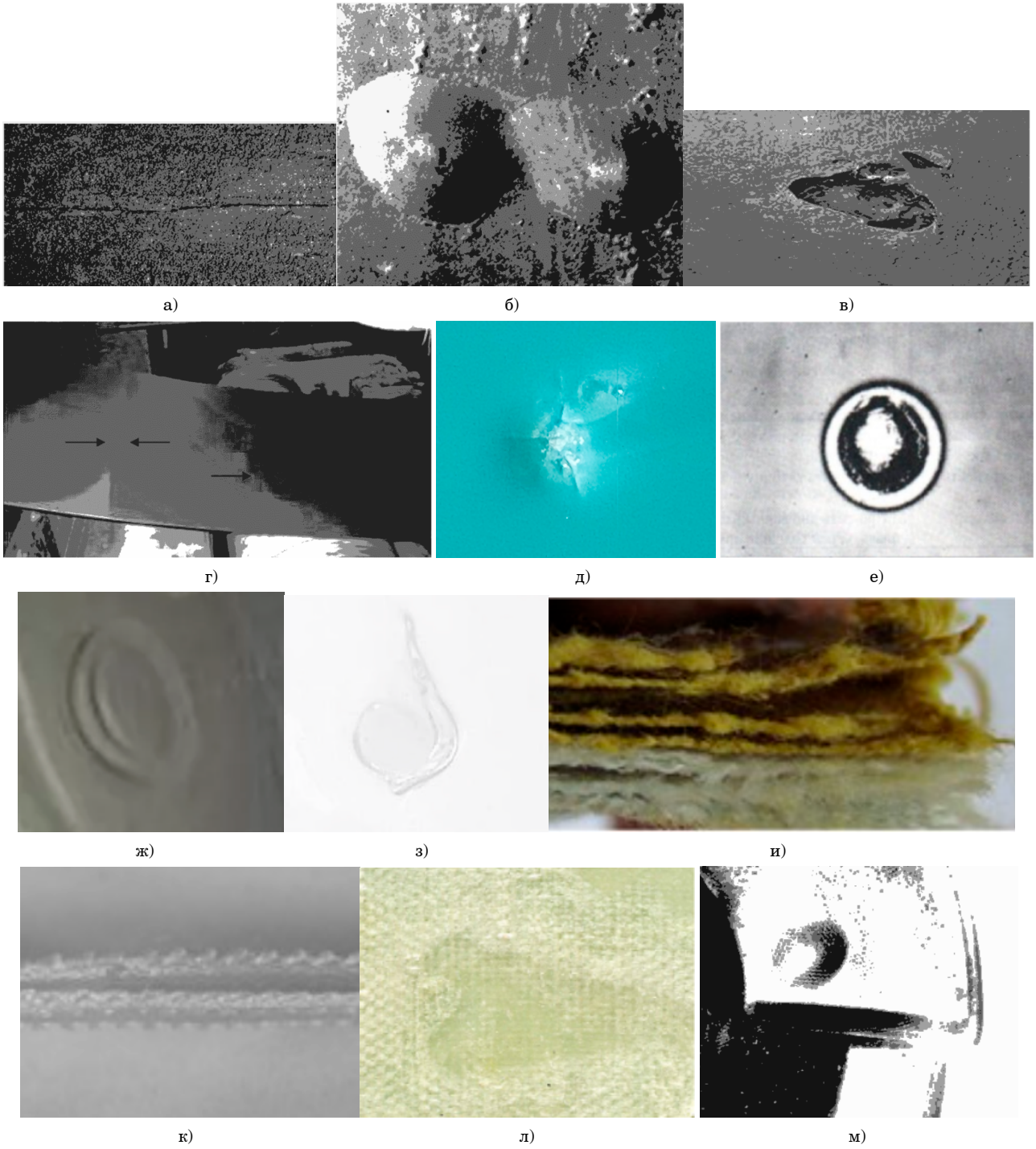


Рис. 2. Дефекты листовых материалов:
а) пузырь-вздутие (металл); б) раскатная трещина (металл); в) раковина/вдав (металл); г) перегибы (металл); д) пузырь (стекло); е) капли олова с ореолом и границей реакции (стекло); ж) свиль (стекло); з) шлир (стекло); и) расслоение (композит); к) трещина (композит); л) сухое пятно (композит); м) пузырь (композит)

Таблица 1

Классификация дефектов

№	Вид дефекта	Материал	Нормативный документ
Трещина			
1	Волосовина	Металл	ГОСТ 21014-2022 Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения

Продолжение табл. 1

№	Вид дефекта	Материал	Нормативный документ
2	Морщины	Металл	ГОСТ 21014-2022 Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения
3	Посечка	Стекло	ГОСТ 32361-2013 Стекло и изделия из него. ПОРОКИ. Термины и определения
4	Царапина	Стекло	ГОСТ 32361-2013 Стекло и изделия из него. ПОРОКИ. Термины и определения
5	Расслаивание краев	Композит	ГОСТ Р 56975–2016 Композиты полимерные. Показатели внешнего вида изделий из многослойных стеклокомпозитов
6	Растрескивание	Композит	ГОСТ Р 56975–2016 Композиты полимерные. Показатели внешнего вида изделий из многослойных стеклокомпозитов
Инородное тело			
7	Раскатанное загрязнение	Металл	ГОСТ 21014-2022 Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения
8	Раскатанная окалина	Металл	ГОСТ 21014-2022 Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения
9	Прилипшая крошка	Стекло	ГОСТ 32361-2013 Стекло и изделия из него. ПОРОКИ. Термины и определения
10	Свиль	Стекло	ГОСТ 32361-2013 Стекло и изделия из него. ПОРОКИ. Термины и определения
11	Инородное включение (металлическое)	Композит	ГОСТ Р 56975–2016 Композиты полимерные. Показатели внешнего вида изделий из многослойных стеклокомпозитов
12	Инородное включение (неметаллическое)	Композит	ГОСТ Р 56975–2016 Композиты полимерные. Показатели внешнего вида изделий из многослойных стеклокомпозитов
Пузырь			
13	Пузырь-вздутие	Металл	ГОСТ 21014-2022 Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения
14	Гармошка	Металл	ГОСТ 21014-2022 Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения
15	Капиллярный пузырь	Стекло	ГОСТ 32361-2013 Стекло и изделия из него. ПОРОКИ. Термины и определения
16	Открытый пузырь	Стекло	ГОСТ 32361-2013 Стекло и изделия из него. ПОРОКИ. Термины и определения
17	Свищ	Композит	ГОСТ Р 56975–2016 Композиты полимерные. Показатели внешнего вида изделий из многослойных стеклокомпозитов
18	Бугристость	Композит	ГОСТ Р 56975–2016 Композиты полимерные. Показатели внешнего вида изделий из многослойных стеклокомпозитов
Вмятина			
19	Раскатанный отпечаток	Металл	ГОСТ 21014-2022 Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения
20	Раковина от выпавшей плены	Металл	ГОСТ 21014-2022 Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения
21	Выколка	Стекло	ГОСТ 32361-2013 Стекло и изделия из него. ПОРОКИ. Термины и определения
22	Раковина	Композит	ГОСТ Р 56975–2016 Композиты полимерные. Показатели внешнего вида изделий из многослойных стеклокомпозитов
23	Пористая поверхность	Композит	ГОСТ Р 56975–2016 Композиты полимерные. Показатели внешнего вида изделий из многослойных стеклокомпозитов
Изменение цвета			
24	Серые пятна	Металл	ГОСТ 21014-2022 Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения

Окончание табл. 1

№	Вид дефекта	Материал	Нормативный документ
25	Цвета побежалости	Металл	ГОСТ 21014-2022 Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения
26	Блюм	Стекло	ГОСТ 32361-2013 Стекло и изделия из него. ПОРОКИ. Термины и определения
27	Выщелачивание	Стекло	ГОСТ 32361-2013 Стекло и изделия из него. ПОРОКИ. Термины и определения
28	Подгорание	Композит	ГОСТ Р 56975–2016 Композиты полимерные. Показатели внешнего вида изделий из многослойных стеклокомпозитов
Изменение геометрии			
29	Рванина на кромках	Металл	ГОСТ 21014-2022 Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения
30	Зазубрины	Металл	ГОСТ 21014-2022 Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения
31	Скол	Стекло	ГОСТ 32361-2013 Стекло и изделия из него. ПОРОКИ. Термины и определения
32	Выступ	Стекло	ГОСТ 32361-2013 Стекло и изделия из него. ПОРОКИ. Термины и определения
33	Непропитанный участок	Композит	ГОСТ Р 56975–2016 Композиты полимерные. Показатели внешнего вида изделий из многослойных стеклокомпозитов
34	Расслаивание краев	Композит	ГОСТ Р 56975–2016 Композиты полимерные. Показатели внешнего вида изделий из многослойных стеклокомпозитов

кацией дефектов, с последующей дефектацией листовых материалов.

Библиографический список

1. *Stenger C., Ulrich M., Wiedemann C.* Machine Vision Algorithms and Applications // Wiley-VCH. 2017. С. 7.

2. *Маркевич А. В., Поляковой М. А.* Применение методов неразрушающего контроля для выявления дефектов горячекатаного металлопроката // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. В. 3. С. 285–291.

3. *Булатов В. В.* Применение системы технического зрения для распознавания дефекта стекла «выщелачивание» // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. 2019. Ч. 2. С. 215–219.

4. *Раменский Д. В.* Анализ возможности применения IT-инструментов «машинного зрения», в части контроля деталей из композиционных материалов, при агрегатно-сборочном производстве // Молодежный вестник ИрГТУ. 2022. Т. 12, № 3. С. 463–467.

5. ГОСТ 21014-2022. Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения. М.: Оформление. ФГБУ «РСТ», 2022. 98 с.

6. ГОСТ 32361-2013. Стекло и изделия из него. Пороки. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 8 с.

7. ГОСТ Р 56975-2016. Композиты полимерные. Показатели внешнего вида изделий из многослойных стеклокомпозитов. М.: Стандартинформ, 2016. 32 с.

УДК: 17.519:62.50:681.306: 681.5:658.011.56:658.562:65.011
DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-331-333

М. В. Сержантова*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРОЦЕССЕ

В статье рассмотрена проблема снижения вероятности возникновения неточных и ошибочных команд в рабочем цикле, произносимых человеком-оператором и интегрированным в управление производственным процессом с помощью голосового помощника. Отмечено, что внедрение голосового помощника позволяет повышать производительность процесса. Решение проблемы найдено в контроле в течение рабочего цикла отрезков высокой работоспособности человека-оператора, что позволит снизить неточные голосовые команды, отдаваемые им для управления оборудованием на производстве. Контролировать отрезки предложено на графике зависимости «рабочий цикл – уровень работоспособности», а именно назначать необходимый темп нарастания/спада работоспособности и длительности нахождения человека-оператора на его оптимальном уровне для данного вида производства.
Ключевые слова: *человек-оператор в производственном цикле, голосовое управление, работоспособность, повышение точности команд на производстве, передаточная функция человека-оператора.*

M. V. Serzhantova*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

MODELING OF THE PROCESS OF CHANGING THE PERFORMANCE OF HUMAN OPERATOR IN THE PRODUCTION PROCESS

The article considers the problem of reducing the probability of inaccurate and erroneous commands in the work cycle pronounced by a human operator and integrated into the control of the production process with the help of a voice assistant. It is noted that the introduction of voice assistant allows to increase the productivity of the process. The solution of the problem is found in the control during the working cycle of the segments of high performance of the human operator, which will reduce inaccurate voice commands given by him to control the equipment in production. It is offered to control the segments on the graph of dependence "working cycle – level of working capacity", namely to assign the necessary rate of increase/decline of working capacity and duration of human operator's presence at its optimal level for the given type of production.
Keywords: *human operator in the production cycle, voice control, work capacity, improving the accuracy of commands in production, transfer function of the human operator.*

Современный производственный процесс максимально снижает участие человека-оператора (ЧО) в монотонном труде, заменяя его труд станками-автоматами и роботизированными линиями [1–4]. Поэтому на первое место выходят интеллектуальные профессиональные навыки человека-оператора и его высокая работоспособность. В этих новых условиях наблюдается интенсификация его умственной и эмоциональной нагрузки в течении производственного процесса.

С появлением технологий голосового управления ЧО может выполнять достаточно много функций, таких как: управление действиями оборудования, его диагностика, переключение режимов его работы, взаимодействие с другим оборудованием. Мониторинговые системы могут быть интегрированы с голосовым управлением, что позволяет вести опасные работы на большом расстоянии.

Становится очевидным, что ошибка при голосовом управлении может носить катастрофический характер и вызвать необратимые последствия. Поэтому вопрос контроля работоспособности ЧО рассматривается с точки зрения выявления наиболее приемлемых временных интервалов, в которых работоспособность находится на высоком уровне и имеет минимальную тенденцию к снижению. В ряде известных работ, например, [1, 2] рекомендуют формирование производственного процесса, работающего без участия человека. Однако, такой отказ,

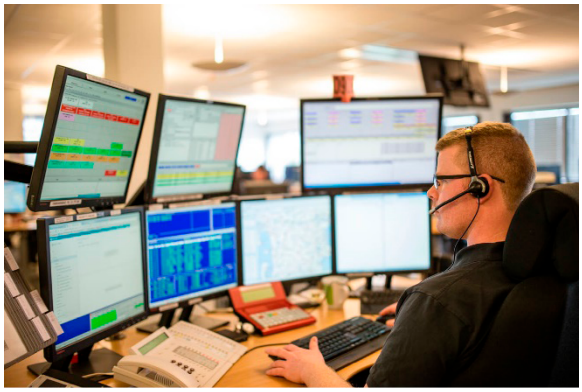


Рис. 1. Голосовое управление оборудованием на технологическом производстве [5]

возможно, не всегда возможен и целесообразен. Примером тому может стать необходимость осуществления дефектовки, которую в силу профессионального опыта может произвести только ЧО или выполнение нестандартных сложных сборочных операций, а также экономические соображения о целесообразности такого внедрения. Кроме того, ЧО на производстве постоянно сталкивается с различными неповторяющимися проблемами такими как: индивидуальная настройка оборудования, меняющаяся производственная и экономическая среда.

Внедрение голосового управления в помощь ЧО (рис. 1) при управлении оборудованием в производственном процессе может быть целесообразным условием для создания среды, обеспечивающей повышение производительности предприятия и благоприятный экономический эффект.

Отметим, что принимать решения и отдавать голосовые команды ЧО надо оперативно, и при этом задача для цифровой среды, ориентированной на человека [3, 4] должна быть распознана четко и однозначно сформулирована. Поэтому при внедрении цифровых (голосовых) помощников, которые позволяют ЧО осуществлять «hands-free взаимодействие» с технологическим оборудованием, необходимо оценивать работоспособность ЧО, чтобы сформулированные им вслух команды для голосового помощника были максимально безошибочные (точные).

В этой связи на первый план выходит выявление временного интервала, в течение которого уровень работоспособности у ЧО наибольший. Поэтому необходимо смоделировать процесс изменения работоспособности ЧО в производственном (рабочем) цикле при взаимодействии его с технологическим оборудованием. Для этого можно сформировать передаточную функцию «рабочий цикл – работоспособность» в течение 8 ч следующим образом. Целесообразно рассмотреть кривую изменения работоспособности ЧО в течение рабочей полусмены длительностью 4 ч. Представим ее как разность $\tilde{h}(t)=\tilde{h}_1(t)-\tilde{h}_2(t)$ кривых нарастания работоспособности и нарастания усталости, которая представляет собой передаточную функцию ЧО:

$$\tilde{W}_{ПТ}(s)=\tilde{W}_1(s)-\tilde{W}_2(s)=$$

$$=\left[k\right]\left\{\frac{1}{\left(\left[\tilde{T}_1\right]s+1\right)}e^{-\left[\tau_1\right]s}-\frac{1}{\left(\left[\tilde{T}_2\right]s+1\right)}e^{-\left[\tau_2\right]s}\right\}, \quad (1)$$

где $\left[k\right]$ – работоспособность (Р), представляется в относительной форме, т. е. в долях сменного задания, принимаемого за единицу, выполняемого за час. $\left[(*)\right]$ – имеется в виду, что системный параметр ЧО в (1) $(*)$ является интервальным [6]. Передаточная функция (ПФ) ЧО (1) описывает «рабочий цикл – работоспособность», в силу того, что между работоспособностью ЧО и готовой продукцией имеется интегральная связь, получает представление:

$$\tilde{W}_{ГП}(s)=\left[k\right]\times$$

$$\times\left\{\frac{1}{\left(\left[\tilde{T}_1\right]s+1\right)}e^{-\left[\tau_1\right]s}-\frac{1}{\left(\left[\tilde{T}_2\right]s+1\right)}e^{-\left[\tau_2\right]s}\right\}\frac{1}{s}. \quad (2)$$

Передаточная функция (2), описывающая производственную деятельность ЧО, несколько неудобна в применении по причине наличия звеньев чистого запаздывания (ЗЧЗ). Однако ПФ ЗЧЗ мультипликативно агрегируются с ПФ апериодических звеньев. Исследования показывают, что удачная аппроксимация ПРФ $h_{АП}\left(t,\tilde{T}_i,\tau_i\right)$ звена с ПФ $\frac{1}{\left(\tilde{T}_i s+1\right)}e^{-\tau_i s}$ достигается с помощью ПРФ $\hat{h}\left(t,T_i,\nu_i\right)$ звена с биномиальной ПФ $\frac{1}{\left(T_i s+1\right)^{\nu_i}}$ так, что оказывается справедливой замена $\frac{1}{\left(\tilde{T}_i s+1\right)}e^{-\tau_i s}$ на $\frac{1}{\left(T_i s+1\right)^{\nu_i}}$. Значения величин T_i и ν_i, могут быть определены на основании данных табл. 1 и кривых (рис. 2), полученных в Matlab с расширением Simulink

Значения величин τ и $t_П$ фиксировались как результаты наблюдения выполнения условий $\tau=\arg\left\{\hat{h}\left(t=\tau,T,\nu\right)=0.05\right\}$ и $t_П=\arg\left\{\hat{h}\left(t=t_П,T,\nu\right)=0{,}95\right\}$. В результате пе-

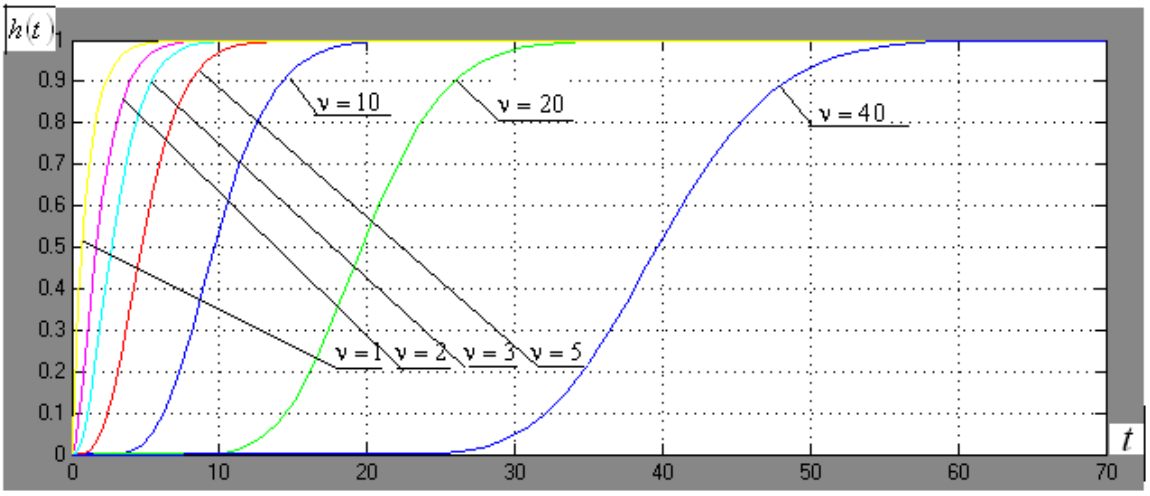


Рис. 2. Кривые переходных функций $\hat{h}(t,T,\nu)$ *звеньев с биномиальной передаточной функцией* $(Ts+1)^{-\nu}$, $T = 1c$.

Таблица 1

ν	1	2	3	4	5	6	10	20	40
τ	0.0513T	0.35 T	0,82 T	1,36 T	1,95 T	2,6 T	5,4 T	13.25 T	30.15 T
t_n	3 T	4.75 T	6.3 T	7.76 T	9.16 T	10.52 T	15.71 T	27.9 T	51 T
t_n/τ	58.48	13.57	7.68	5.7	4.7	4.04	2.91	2.1	1.69

редаточная функция (2) получает представление:

$$\tilde{W}(s) = [k]\left\{\frac{1}{([T_1]s+1)^{\nu_1}} - \frac{1}{([T_2]s+1)^{\nu_2}}\right\}\frac{1}{s}. \quad (3)$$

Полученная передаточная функция (3) и табл. 1 позволяют моделировать и прогнозировать возможные задержки и ошибки при использовании ЧО голосового управления, вызванные снижением работоспособности в течение рабочей полусмены.

Исследования по приведенным в данной работе зависимостям, которые отражают изменение работоспособности ЧО, а также анализ взаимодействия его с технологической системой показывает, что «задействовать» ЧО в активной фазе целесообразно не более 3,5–4 ч рабочей полусмены. Это позволяет обеспечить достаточно низкую вероятность возникновения ошибочных действий и команд с его стороны при использовании голосового управления.

Библиографический список

1. Human-free robotic automation of industrial operations / O. I. Borisov [et al.] // IECON 2016. 42nd Ann. Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society. Florence, Italy, 2016. P. 6867–6872. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793922.

2. Case study on human-free water heaters production for Industry 4.0 / O. I. Borisov [et al.] // 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). St. Petersburg, Russia, 2018. P. 369–374. DOI: 10.1109/ICPHYS.2018.8387686.

3. Human-centered design of assistance systems for production planning and control: the role of the human in Industry 4.0 / J. Nelles [et al.] // 2016 IEEE Intern. Conf. on Industrial Technology (ICIT). Taipei, Taiwan, 2016. P. 2099–2104. DOI: 10.1109/ICIT.2016.7475093.

4. The operator 4.0: human cyber-physical systems and adaptive automation towards human-automation symbiosis work systems / D. Romero [et al.] // Advances in Production Management Systems. Initiatives for a Sustainable World. Iguassu Fall, Brazil, 2016. Vol. 488. P. 677–686. DOI: 10.1007/978- 3-319-51133-7_80.

5. *Дударенко Н. А., Сержантова М. В., Ушаков А. В.* Представление производственной деятельности антропокомпонента – оператора непрерывной динамической моделью с интервальными параметрами // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2012. № 5. С. 36–43.

УДК 621.314.222.6 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-334-339**

***А. А. Софронов** **
студент
***А. А. Мартынов** **
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ЗАДАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ НА ХАРАКТЕР ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПУСКА ТРАНСФОРМАТОРОВ

В работе произведена сравнительная оценка различных методов моделирования трехфазного трансформатора и приведены методы задания параметров материалов. На основе реальных осциллограмм пуска определена динамическая модель, которая дает наиболее точное представление о амплитуде и форме пусковых токов трансформатора. Рассмотрены методы задания кривой намагничивания: линейная, линейная с перегибом, кусочно-линейное задание, модель Джайлса – Атертона.
Ключевые слова: *бросок пускового тока, магнитный гистерезис, трехфазный трансформатор, модель Джайлса – Атертона.*

A. A. Sofronov*
Student
A. A. Martynov*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE INFLUENCE OF TRANSFORMER CORE PARAMETERIZATION METHODS ON INRUSH CURRENT TRANSIENT

The paper provides a comparative assessment of various methods for modeling a three-phase transformer and methods for setting material parameters. Based on real start-up waveforms, a dynamic model has been determined that provides the most accurate representation of the amplitude and shape of the transformer starting currents. Methods for defining the magnetization curve are considered: linear, linear with saturation, nonlinear, Jiles – Atherton model.
Keywords: *inrush current, magnetic hysteresis, three-phase transformer, Jiles – Atherton model.*

Введение

Силовые и преобразовательные трансформаторы – это неотъемлемая часть судовых электроэнергетических систем и электрических сетей. Они позволяют преобразовывать уровень напряжения для оптимизации передачи энергии на дальние расстояния и позволяют получать необходимые фазовые сдвиги между напряжениями вторичных обмоток для преобразователей энергии.

Для моделирования трансформаторов применяются разнообразные математические модели. Эти модели строятся на различных принципах: в некоторых они представлены в виде электрической схемы замещения со сосредоточенными параметрами и приведенной нагрузкой [1–4], в других – через матрицы взаимных и собственных индуктивностей [5]. Также существуют пакеты моделирования, позволяющие симулировать работу трансформатора методом конечных элементов [6–8]. Это разнообразие обусловлено сложностью описания переходных режимов и различными целями моделирования. Применение готовых моделей не дает достаточной гибкости настройки для получения точных значений амплитуды токов при пуске.

Целесообразно рассмотреть динамические модели трансформаторов, основанные на различных описаниях ферромагнитного сердечника. При этом особое внимание в работе уделяется точности моделирования пусковых токов. Точность моделирования приходных процессов пуска важна при проектировании судовых преобразователей частоты. Судовая электроэнергетическая сеть обладает гораздо меньшим запа-

сом мощности по сравнению с обычными электрическими сетями, поэтому вопрос обеспечения устойчивой работы при подключении мощных преобразователей является актуальной. Бросок пускового тока может многократно превышать номинальные токи трансформатора и в условиях ограниченной мощности генератора может привести к полному и частичному отключению в случае перегрузки генератора. Для предотвращения такого сценария применяются различные методы ограничения пусковых токов. Для выбора и определения параметров необходима модель, которая максимально полно отражает переходный процесс пуска и позволяет учесть наложение переходного процесса заряда емкости звена постоянного тока силового преобразователя.

Во многом переходный процесс пуска зависит от процессов, протекающих в ферромагнитном сердечнике трансформатора, поэтому для динамических моделей трансформаторов необходимо учитывать нелинейные свойства магнитопровода и явление магнитного гистерезиса. В работе [9] показано влияние остаточного потока намагничивания на пуск трансформатора.

Описание математической модели

Динамическая модель трехфазного трансформатора разработана на основе библиотеки Matlab Simscape. Она представляет собой взаимосвязанную магнитную и электрическую цепь. На рис. 1 представлена схема магнитопровода трансформатора, на рис. 2 – соответствующие ей магнитная и электрическая схемы замещения на основе Simscape. Связь между магнитной и электрической схемами осуществляется через блок идеального электромагнитного преобразователя.

Протекающий ток в обмотке создает магнитодвижущую силу:

$$F = Wi, \quad (1)$$

где F – МДС обмотки; W – количество витков обмотки; i – ток обмотки.

При прохождении через обмотку изменяющегося магнитного потока на ее выводах возникает напряжение, которое определяется как:

$$U = -W\frac{d\Phi}{dt} + \frac{W^2}{R_{м.р}}\frac{di}{dt} + Ri, \quad (2)$$

где U – напряжение на выводах обмотки; – поток проходящий через обмотку; $R_{м.р}$– магнитное сопротивление рассеяния обмотки; – активное сопротивление обмотки.

Напряжение включает ЭДС самоиндукции, ЭДС взаимной индукции и падение напряжения на активном сопротивлении обмотки.

В формуле 2 присутствует магнитное сопротивление, оно нелинейно для ферромагнитного сердечника. Свойства материала можно описать как зависимость магнитной проницаемости от значения напряженности магнитного поля (рис. 3). Данную зависимость для моделирования можно выразить через магнитную индукцию и напряженность магнитного поля в сердечнике B(H). В данной работе рассматриваются следующие варианты задания кривой намагничивания материала (рис. 4):

– Линейная – не учитывает свойства материала при насыщении. Продлевает линейный участок кривой намагничивания;

– Одна точна насыщения – график состоит из линейного участка и точки после которого наклон меняется;

– Кусочно-линейная аппроксимация – задание кривой намагничивания по множеству точек и интерполяции значений между ними;

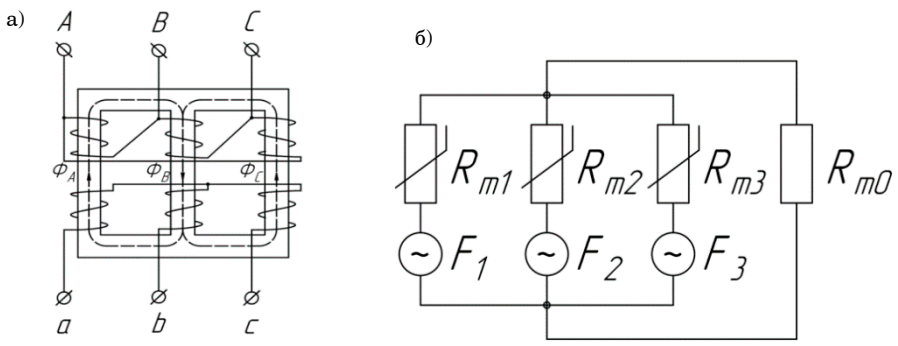


Рис. 1. Магнитный сердечник трансформатора (а); схема замещения магнитной системы трансформатора (б)

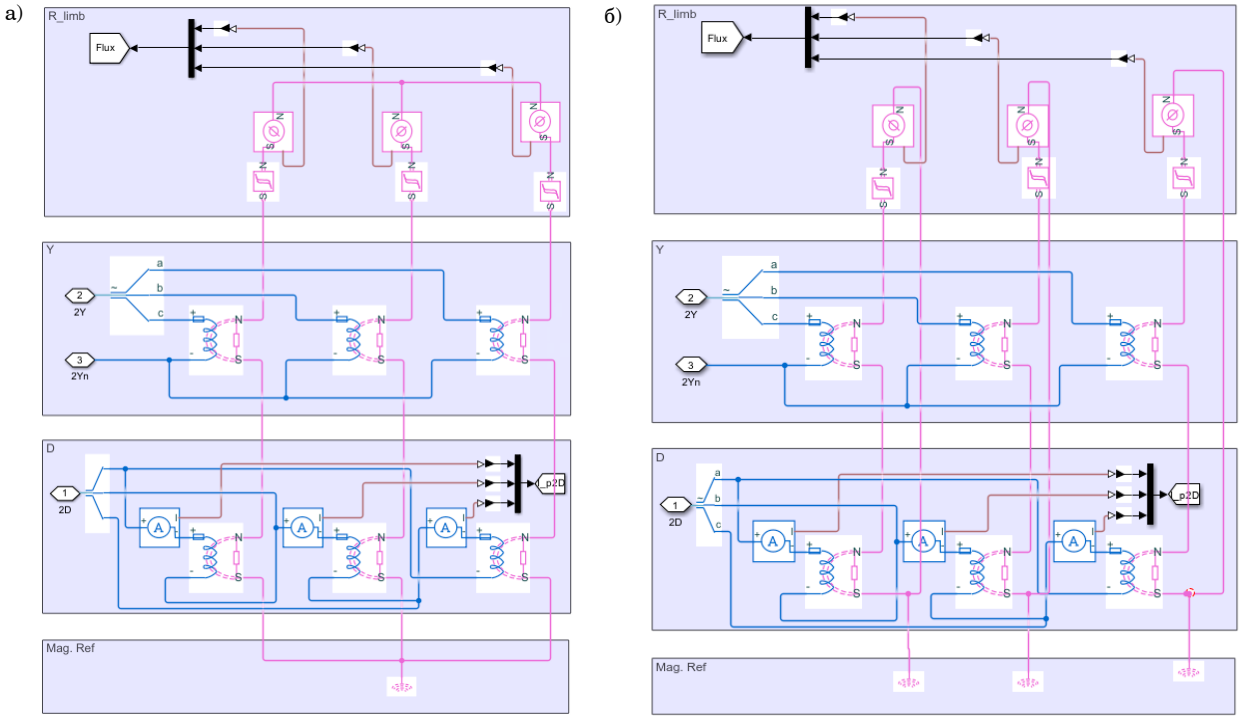


Рис. 2. Модель трехфазного трехстержневого трансформатора (а); модель трехфазного группового трансформатора (б)

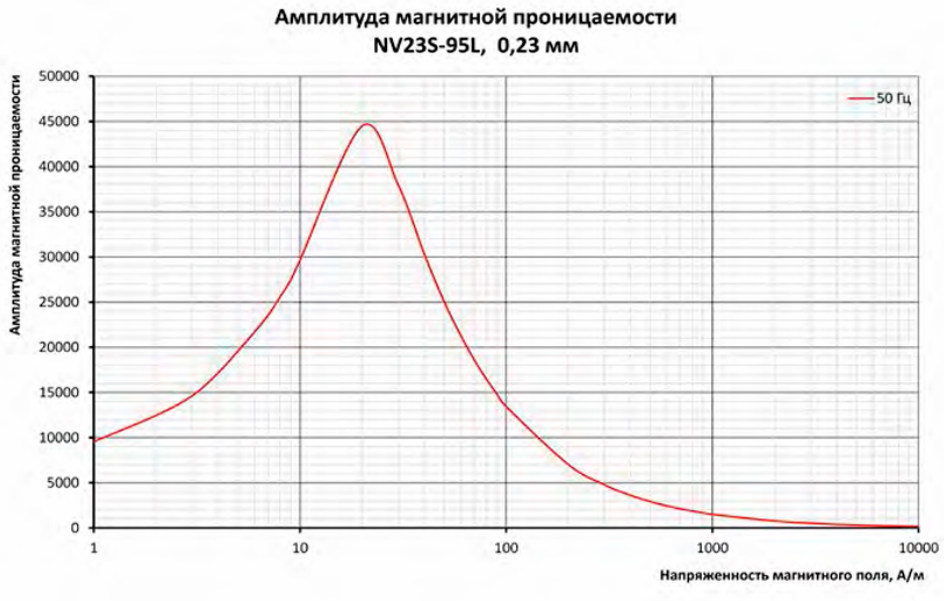


Рис. 3. Магнитная проницаемость электротехнической стали

– Модель магнитного гистерезиса Джайлса – Атертона – намагничивание сердечника представляется как объединение трех составляющих: безгистерезиной намагниченности, обратимой и необратимой намагниченности.

Параметры трехфазного трансформатора

Параметры рассматриваемого трехфазного трехстержневого трансформатора приведены в табл. 1. Для данного трансформатора были

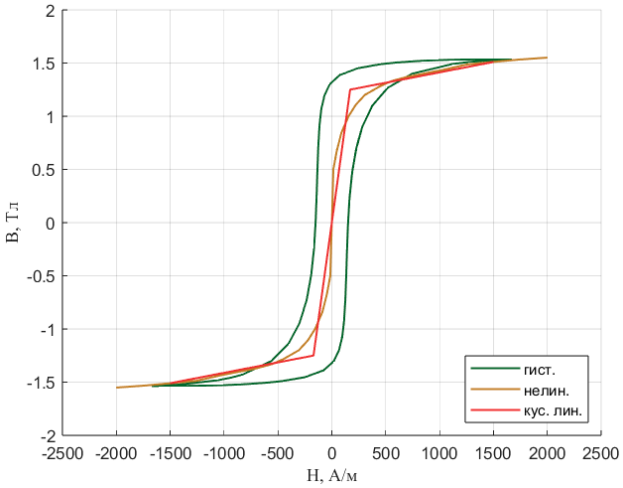


Рис. 4. Кривая намагничивания для сердечника трансформатора

Таблица 1

Параметры трансформатора

Мощность, МВА	32
$U_{вн}$, кВ	110
$U_{нн}$, кВ	10
I_0, А	0,4
$P_{сталь}$, кВт	14,1
$P_{медь}$, кВт	110,7
$U_к$, %	13
$R_{нн}$, Ом	1,23
$R_{вн}$, Ом	0,035

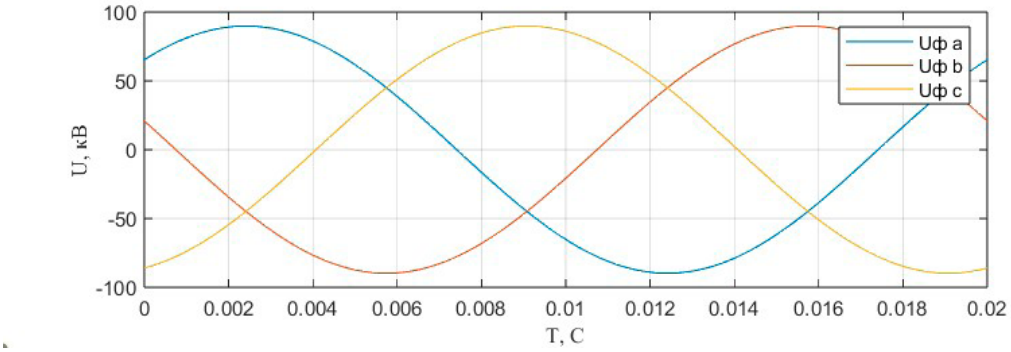


Рис. 5. Фазное напряжение первичной обмотки

проведены замеры токов и напряжений при пуске [1]. Исходя из этих данных были рассчитаны параметры математической модели, далее будет проведено сравнение различных методов задания кривой намагничивания и реальных замеров на трансформаторе.

Результаты моделирования и измерений

Для оценки модели было произведено моделирование прямого пуска трехфазного трансформатора. В каждом опыте параметры источника и момента включения были неизменны, отличие состояло только в виде используемой кривой намагничивания. Для получения наиболее полного соответствия опытов и замеров был рассчитан момент времени подключения трансформатора к сети при проведении замеров и косвенно оценена остаточная индукция. Сдвиг фазы напряжения для фазы А составил π/4, фазные напряжения, подводимые к трансформатору показаны на рис. 5.

Результаты моделирования трансформатора показаны на рис. 6 и 7. На рис. 6 приведены зна-

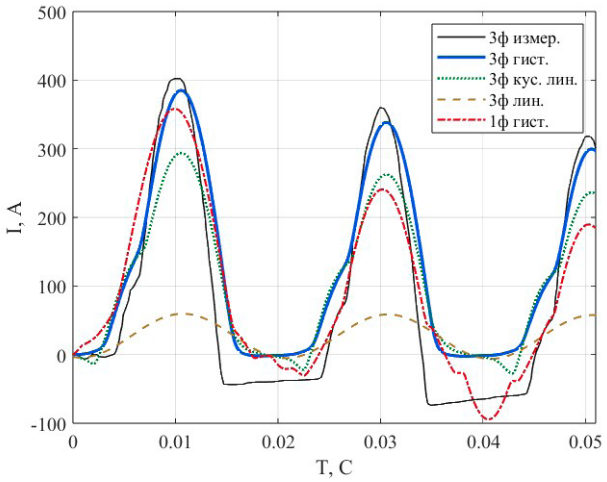


Рис. 6. Сравнение вариантов задания кривой намагничивания

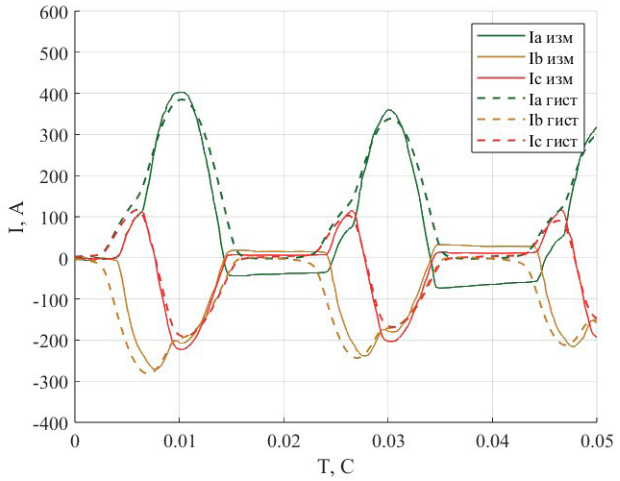


Рис. 7. Измерение и моделирование с учетом магнитного гистерезиса Джайлса – Атертона

чения токов в фазе А. Для рассматриваемого момента времени включения трансформатора в данной фазе происходит наибольший бросок тока. Обозначение на рисунке: «3Ф» и «1Ф» показывает тип сердечника (однофазный или трехфазный), «гист». – модель гистерезиса Джайлса – Атертона, «кус.лин.» – кусочно-линейная кривая намагничивания, «лин.» – линейная кривая намагничивания без насыщения. На рис. 7 нанесены токи всех фаз для замеров и модель трехфазного сердечника с гистерезисом.

Таблица 2

Среднеквадратичное отклонение токов

	Среднеквадратичное отклонение тока при моделировании от измерений, А		
Тип сердечника	фаза А	фаза В	фаза С
3Ф гистерезис	58.09	50.01	24.51
3*1Ф гистерезис	60.12	94.02	88.36
3Ф нелинейная	66.81	68.42	62.26
3Ф линейная	142.57	97.34	81.65

Таблица 3

Относительная ошибка моделирования

	Ошибка амплитудного значения первого броска тока, %		
Тип сердечника	фаза А	фаза В	фаза С
3Ф гистерезис	4.29	-3.84	14.38
3*1Ф гистерезис	10.93	-28.83	22.29
3Ф нелинейная	26.97	-10.83	36.38
3Ф линейная	85.21	78.07	85.54

По результатам моделирования была произведена оценка точности моделирования. В табл. 2 приведены значения среднеквадратичного отклонения мгновенных значений токов при переходном процессе пуска. Модель, построенная на основе трехфазного сердечника и гистерезисной модели материала, дала минимальное отклонение среди остальных вариантов. В фазе с наибольшим током среднеквадратичное отклонение тока не превышает 60А при максимальном токе 400А, также амплитуда первого броска тока для модели Джайлса – Атертона отличается менее, чем на 5% относительно измеренного значения.

Заключение

В данной работе были рассмотрены различные методы задания кривых намагничивания сердечников динамических моделей трехфазных трансформаторов. Наилучший результат среди рассмотренных дал трехстержневой сердечник с применением нелинейного магнитного гистерезиса Джайлса – Атертона. Полученная форма пусковых токов содержит все характерные участки, которые были зафиксированы при измерениях. Точность моделирования непосредственно определяется кривой намагничивания материала и корректностью определения коэффициентов модели магнитного гистерезиса Джайлса – Атертона Изменение наклона кривой намагничивания в линейной области и коррекция значения коэрцитивной силы влияют на форму токов при переходном процессе, а наклон кривой намагничивания и значение остаточной индукции определяют амплитуду пусковых токов.

Разделение трехфазного трансформатора на три независимых однофазных возможно при условии правильного пересчета параметров сердечника. Важно учитывать, что трехфазный сердечник несимметричен. Длинна средней линии для крайних стержней больше чем для центрального стержня из-за дополнительного участка ярма трансформатора. Такой подход значительно снижает время, затрачиваемое на моделирование, при этом относительная ошибка амплитуды первого броска тока составила 11%. Данная модель может быть применена для моделирования сложных и интегрированных систем.

Библиографический список

1. The Impact of Iron Core Model on Dynamic Behavior of Three-Phase Power Transformer Dynamic

Model / K. De□elak [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 1, pp. 1–4, Jan. 2015.

2. *Подобный А. В.* Методика создания цифровых двойников трансформаторов на основе корректируемых по результатам эксперимента имитационных моделей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12. Иваново, 2022. 20 с.

3. Полиномиальная регрессионная модель основной кривой намагничивания для аморфных материалов многофазных преобразователей тока и напряжения / Б. А. Коробейников [и др.] // Наука. Новое поколение. Успех: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне, Краснодар, 28 марта 2020 года. Краснодар: ИД – Юг, 2020. С. 91–96.

4. Модифицированный алгоритм трехмерной модели векторного магнитного гистерезиса применительно к методу пространственных интегральных уравнений / И. Б. Подберезная [и др.] // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2023. № 3(108). С. 37–55.

5. Calculation of Inrush Currents – Benchmarking of Transformer Models / N. Chiesa [et al.] // Proceedings of International Conference on Power Systems Transients (IPST 2011), June 14–17, 2011, Delft, pp. 18–27.

6. *Gans Š., Molnár J., Kováč D.* Estimation of Jiles – Atherton Parameters of Toroid Cores Using MATLAB/ Simulink // ACTA PHYSICA POLONICA A. 2023. № 5 (Vol. 143). P. 389–399.

7. *Снитько И. С.* Разработка методики расширенного поверочного расчета в САПР силовых трансформаторов на базе имитационных моделей: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.12. Иваново, 2022. 154 с.: ил.

8. *Ярымбаш С. Т., Килимник И. М.* Моделирование электромагнитных процессов при работе силовых трансформаторов под нагрузкой и в режиме холостого хода // Проблемы региональной энергетики. 2020. № 1 (45). С. 1–12.

9. Моделирование электромагнитных процессов пуска трансформатора в составе преобразователя частоты электропривода гребного винта / А. А. Мартынов [и др.] // Труды КГНЦ. 2023. Т. 3, № 405. С. 99–116.

УДК 621.311 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-340-344**

Н. К. Суслин*
студент
И. М. Тихомиров*
студент
М. В. Сержантова*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОДА

Согласно распоряжениям Правительства Российской Федерации, которые направлены на преобразование и модернизацию энергетической инфраструктуры страны с помощью внедрения цифровых технологий для повышения ее эффективности и безопасности в статье рассмотрена проблема оптимизации распределения нагрузок между тремя агрегатами ГЭС методом динамического программирования с помощью программного кода.
Ключевые слова: *оптимизация использования энергетических ресурсов, автоматизация процессов, оценка затрат.*

N. K. Suslin*
Student
I. M. Tikhomirov*
Student
M. V. Sergeantova*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ON THE FORMULATION OF THE OPTIMIZATION RESEARCH PROBLEM USING VARIOUS METHODS

According to the orders of the Government of the Russian Federation, which are aimed at transforming and modernizing the energy infrastructure of the country through the introduction of digital technologies to improve its efficiency and safety , the article considers the problem of optimizing the distribution of loads between three units of HPP by the method of dynamic programming with the help of software code.
Keywords: *optimization of energy resources use, process automation, cost estimation.*

В соответствии с распоряжениями [1–3] Правительства о цифровизации и оптимизации использования ресурсов в энергетической отрасли решается задача нахождения оптимальной комбинации включенных агрегатов на электростанции для разных вариантов потребляемой мощности. Сравниваются варианты выбора оптимального режима вручную и в автоматизированном режиме. В ручном режиме методом динамического программирования на первом этапе перебираются оптимальные комбинации для двух агрегатов и заносятся в таблицу. На втором этапе осуществляется поиск оптимальных комбинаций для трех агрегатов. По полученным результатам для каждого агрегата строится график работы при различных значениях мощностей. Этот способ является весьма трудоемким, поэтому было принято решение оптимизировать расчет с помощью разработанного авторами алгоритма, реализованного в программном коде на Java.

В табл. 1 приведены исходные данные для трех агрегатов. Исходными данными является объем пара Q, который потребляет определенный агрегат для генерации определенной мощности P. Необходимо разработать алгоритм, который будет находить такие комбинации задействованных агрегатов, которые при наименьшем расходе пара будут способны выдать не меньше мощности в сеть, чем потребляет нагрузка. Этот алгоритм, в отличие от алгоритма при помощи метода динамического программи-

Таблица 1

Исходные данные

Нагрузка агрегата, МВт	P1 = 0	P2 =50	P3 =60	P4 =70	P5 =80	P6 =90	P7 =100
Агрегат 1	0	27	32	38	42	46	52
Агрегат 2	0	30	36	41	45	48	50
Агрегат 3	0	21	22	24	28	35	50

рования, будет рассчитывать все возможные комбинации для всех агрегатов и выбирать среди них самые эффективные. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.

Рассмотрим совместную работу двух агрегатов в диапазоне целевых суммарных мощностей от 0 до 300 МВт с шагом 10 МВт. Исходные

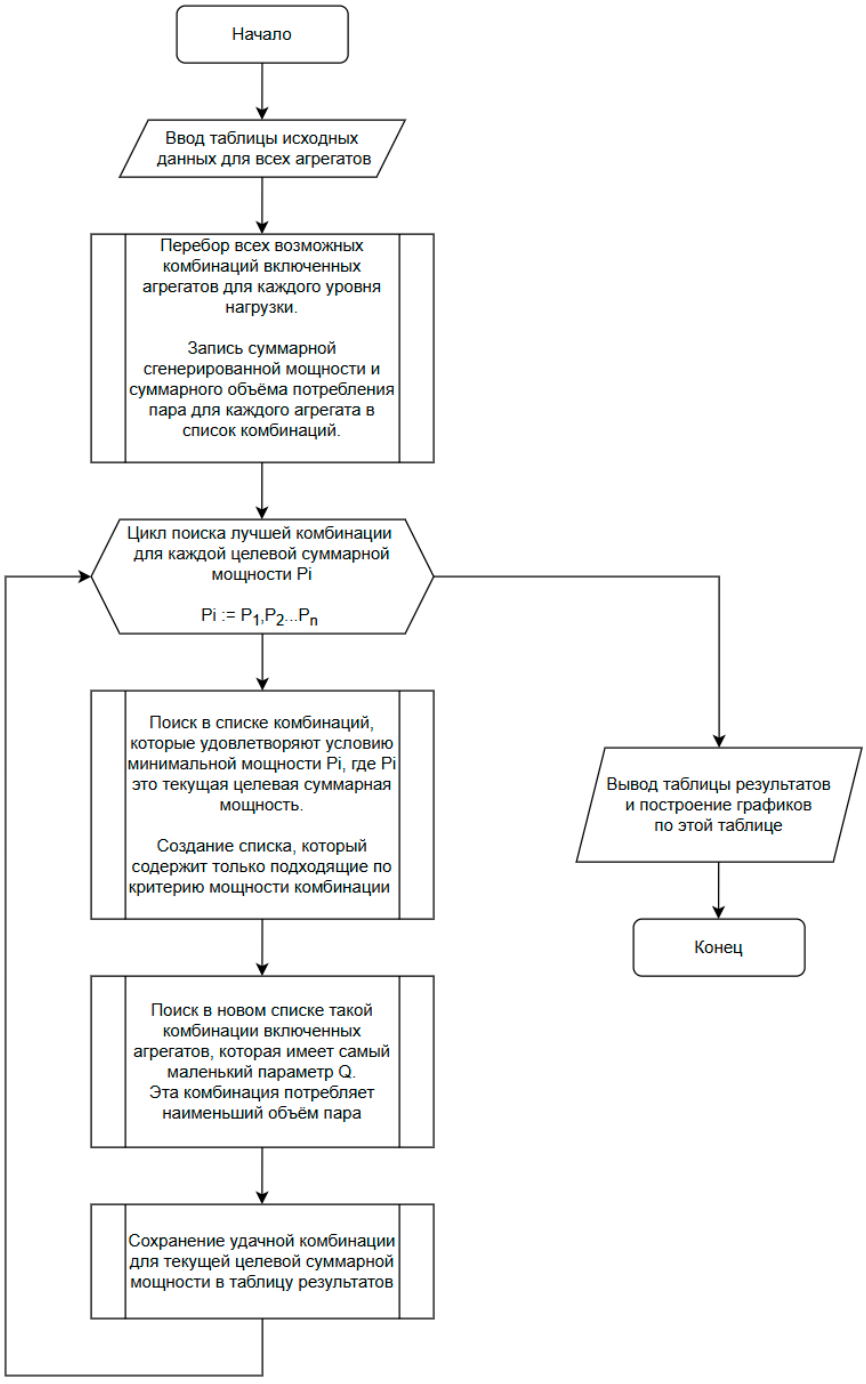


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

данные взяты из табл. 1. Результат работы программы приведен в табл. 2 и на рис. 2.

Таблица 2

Результат расчета комбинаций для двух агрегатов

P2э, МВт	P1, МВт	P2, МВт	Q1, м3/с	Q2, м3/с	Q2э, м3/с
0	0	0	0	0	0
10	50	0	27	0	27
20	50	0	27	0	27
30	50	0	27	0	27
40	50	0	27	0	27
50	50	0	27	0	27
60	60	0	32	0	32
70	70	0	38	0	38
80	80	0	42	0	42
90	90	0	46	0	46
100	0	100	0	50	50
110	60	50	32	30	62
120	70	50	38	30	68
130	80	50	42	30	72
140	50	90	27	48	75
150	50	100	27	50	77
160	60	100	32	50	82
170	70	100	38	50	88
180	80	100	42	50	92
190	90	100	46	50	96
200	100	100	52	50	102

Рассмотрим совместную работу трех агрегатов в диапазоне целевых суммарных мощностей мощностей от 0 до 300 МВт с шагом 50 МВт. Исходные данные взяты из табл. 1. Результат работы программы приведен в табл. 3 и на рис. 3.

Таблица 3

Оптимальная работа 3х агрегатов

P3э, МВт	P1, МВт	P2, МВт	P3, МВт	Q1, м3/с	Q2, м3/с	Q3, м3/с	Q3э, м3/с
0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	50	0	0	21	21
100	50	0	50	27	0	21	48
150	80	0	70	42	0	24	66
200	80	50	70	42	30	24	96
250	80	100	70	42	50	24	116
300	100	100	100	52	50	50	152

Таблица 4

Исходные данные

Нагрузка агрегата, МВт	P1 = 0	P2 =50	P3 =60	P4 =70	P5 =80	P6 =90	P7 =100
Агрегат 1	0	11	20	30	33	40	47
Агрегат 2	0	30	36	41	45	48	52
Агрегат 3	0	27	32	38	42	46	52

Рис. 2. График оптимальной загрузки двух агрегатов с шагом 10 МВт

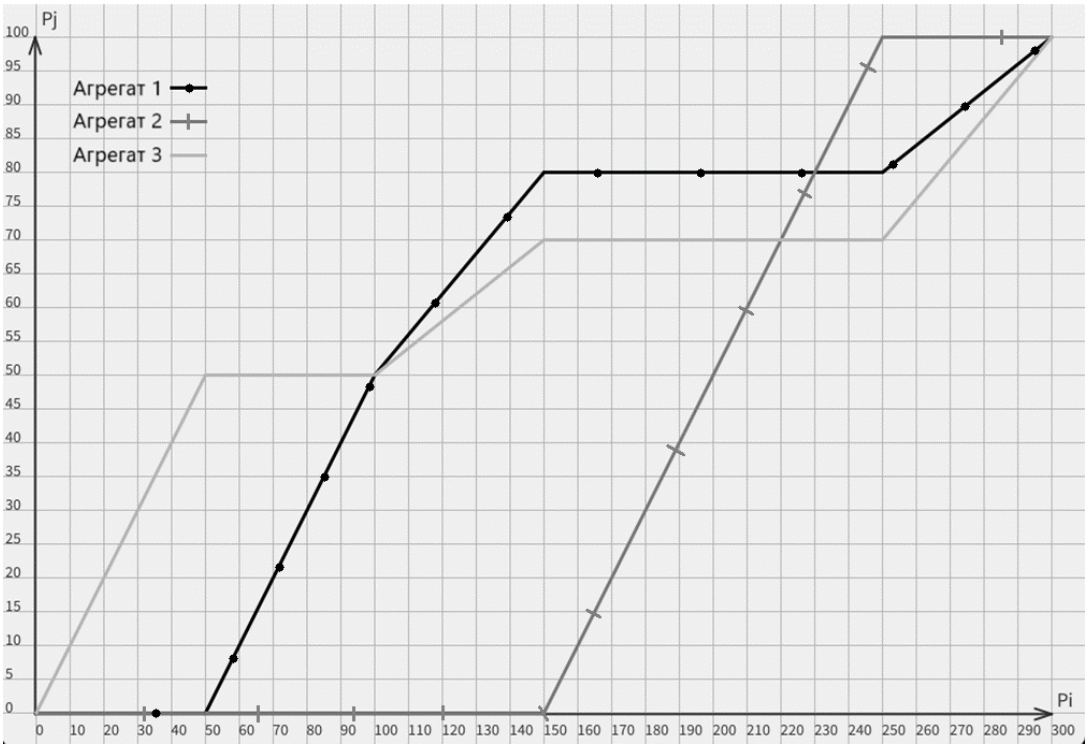


Рис. 3. График оптимальной загрузки трех агрегатов с шагом 50 МВт

Сравним графики переключения режимов работы агрегатов, построенные на основе расчетов методом динамического программирования (рис. 4) в ручном режиме основе и разработанного алгоритма в автоматизированном режиме (рис. 5) на основе табл. 4

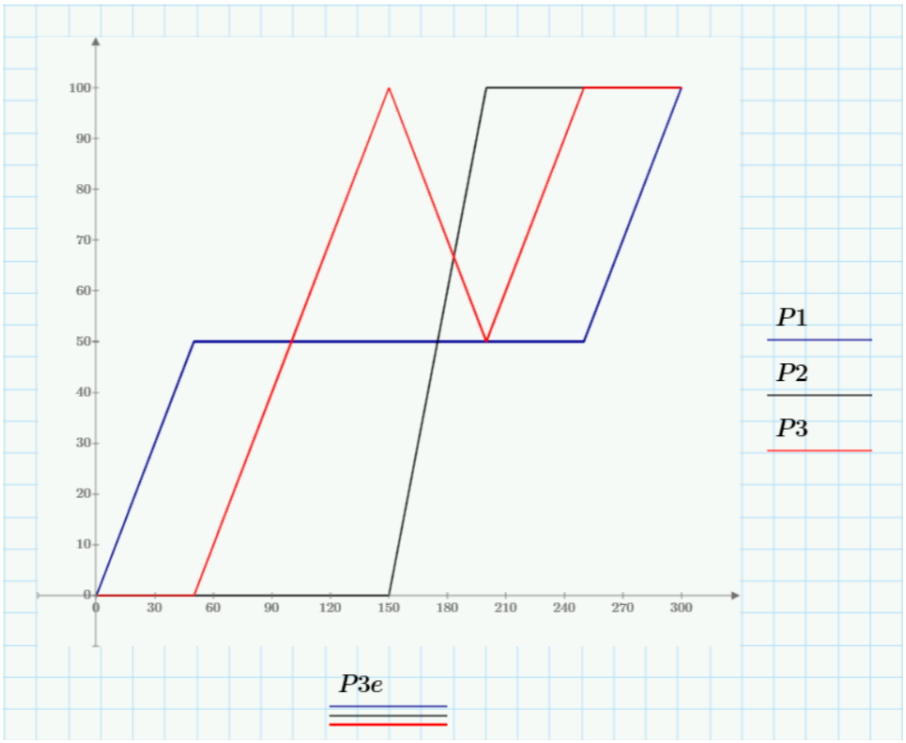


Рис. 4. График оптимальной загрузки трех агрегатов с шагом 50 МВт, рассчитанный методом динамического программирования

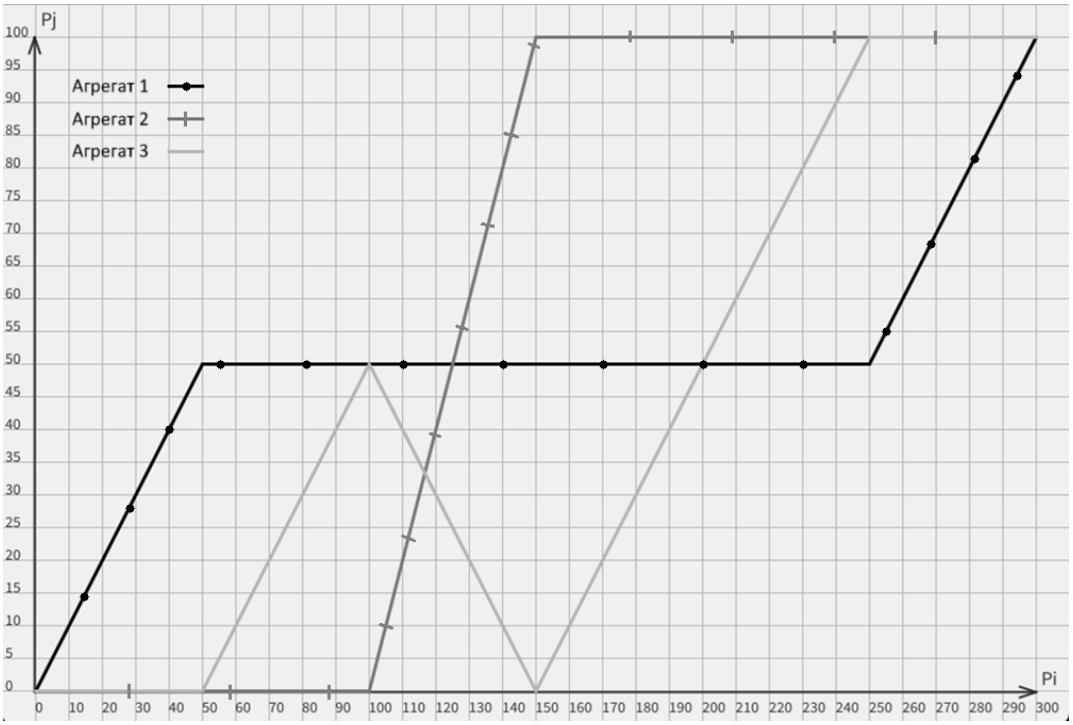


Рис. 5. График оптимальной загрузки трех агрегатов с шагом 50 МВт, построенный с использованием программы

Итак, выполнена задача автоматизированной оптимизации бережливого отношения к ресурсам. Для этого разработан алгоритм, который строит оптимальные комбинации работы агрегатов. В качестве визуализации представлены графики, которые показывают экономию ресурсов. Данный алгоритм может быть масштабирован для произвольного числа агрегатов, а также адаптирован для решения аналогичных задач оптимизации ресурсов в других отраслях. При сравнении результата работы программы с результатом ручного перебора, выявлено, что результаты отличаются комбинациям и построенным графикам, но суммарный расход пара на все агрегаты для разной потребляемой мощности получен одинаковым.

Библиографический список

1. Распоряжение Правительства РФ от 28 декабря 2021 года № 3924-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса». URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403233017/ (дата обращения: 08.12.2024).

2. Распоряжение Правительства РФ от 12 марта 2024 года № 581-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса до 2030 года». URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408610169/ (дата обращения: 08.12.2024).

3. Постановление Правительства РФ от 9 сентября 2023 г. № 1473 «Об утверждении комплексной государственной программы Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности».

4. Философия Java. 4-е полн. изд. СПб.: Питер, 2015. 1168 с.: ил. (Серия «Классика computer science»).

УДК 621.314.1 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-345-348**

Е. А. Шершунова*
кандидат технических наук, заведующий лабораторией
С. И. Мошкунов*
доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заведующий отделением
**ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН*

ИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Рассмотрены подходы к построению силовых импульсных преобразователей постоянного тока для электротранспорта. Приведена методика расчета потерь силовых элементов схемы. На примере понижающего-повышающего преобразователя приведен алгоритм управления его работой. Приведены технические характеристики преобразователей напряжения, разработанных в Институте электрофизики и электроэнергетики РАН.
Ключевые слова: *силовой импульсный преобразователь напряжения, эффективность, система управления.*

E. A. Shershunova*
PhD, Tech., Head of Laboratory
S. I. Moshkunov*
Dr. Sc., Tech., Corresponding Member of RAS, Head of Department
** Institute for Electrophysics and Electric Power, Russian Academy of Sciences*

PULSE VOLTAGE CONVERTERS FOR ELECTRIC VEHICLES

The approaches to the construction of pulse power dc/dc converters for electric vehicles are considered. The method of calculating the losses of power elements of the circuit is given. The algorithm of the converter operation control is given on the example of a buck/boost DC/DC device. The technical characteristics of the voltage converters developed at the Institute for Electrophysics and Electric Power RAS are presented.
Keywords: *pulse power voltage converter, efficiency, control system.*

Введение

Современная мировая повестка диктует требование переходить от энергии сгорания топлива к альтернативным источникам на транспорте, что связано, прежде всего с его ограниченными запасами, а также с выбросами и шумом [1, 2]. Источниками электроэнергии могут служить солнечные и аккумуляторные батареи, топливные элементы, суперконденсаторы. В силовых установках используются сборки таких элементов, что позволяет получать источники требуемой мощности. Тем не менее, из-за нелинейности вольтамперных характеристик описанных элементов в ходе работы напряжение на них падает, что, безусловно, должно быть скорректировано при подаче мощности от этих источников на основную шину питания электромотора. Стабилизация напряжения, и в ряде случаев, тока источников осуществляется с помощью импульсных преобразователей напряжения постоянного тока.

Сегодня к таким устройствам, используемых в составе электромобилей и, особенно, авиатранспорта, предъявляются очень жесткие требования как по эффективности, так и по удельной мощности, отношению мощности устройства к его массе. Так, эффективность устройств должна стремиться к 99%, а удельная мощность составлять не менее 10–15 кВт/кг. Так, цель НАСА достичь удельной плотности мощности в 15 кВт/кг в 2026 г. и 20 кВт/кг к 2030 г. для преобразователей напряжения, используемых на борту летательных аппаратов [3]. Такие числа могут быть достигнуты за счет современных полупроводниковых устройств, способных работать при высоких частотах повторения, а также за счет повышения напряжения на шине.

Схема импульсного понижающего-повышающего преобразователя напряжения

На рис. 1 приведена схема импульсного понижающего-повышающего преобразователя.

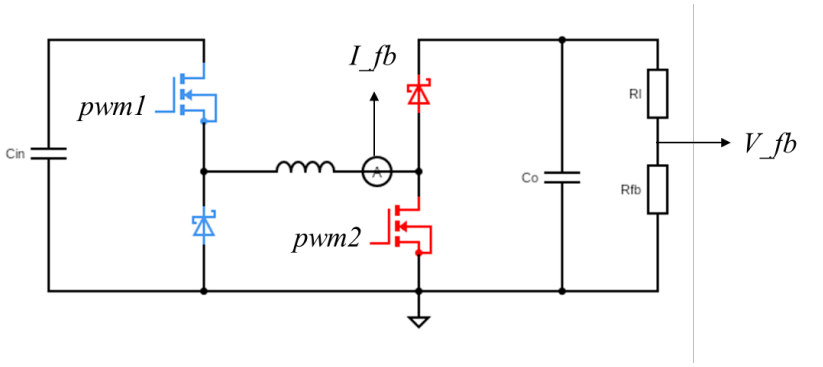


Рис. 1. Схема импульсного понижающего-повышающего преобразователя напряжения

За понижение напряжения отвечает цепь, образуемая синим транзистором, диодом и дросселем, за повышение – красным транзистором, диодом и дросселем. Управление такими преобразователями происходит посредством широтно-импульсной модуляции. Представленная схема подразумевает стабилизацию как по выходному напряжению, так и по току [4].

На рис. 2 показан метод управления транзистором. Синим цветом показано управление левым плечом, отвечающим за понижение напряжения, красным – за повышение напряжения. Стабилизация напряжения происходит посредством работы усилителя ошибки по напряжению, где усиливается сигнал ошибки между заданным напряжением *V_ref1* и напряжением обратной связи. Через напряжение *V_ref2* задается предельное значение тока. Сигнал с датчика тока *I_fb* сравнивается с установленным значением *V_Iset*. Сигнал ошибки по току *E2*, пилообразный сигнал поступают на вход компаратора, на выходе которого формируется ШИМ-сигнал *pwm1*, который поступает на драйвер управления затвором транзистора в плече понижения напряжения. Сигнал управления транзистором в схеме повышения формируется аналогичным образом, однако на компаратор поступает сигнал ошибки *E2*, смещенный на некоторое напряжение *V_b*.

Управление преобразователем можно и реализовать с помощью цифрового интерфейса. В этом случае усилители ошибки заменяются

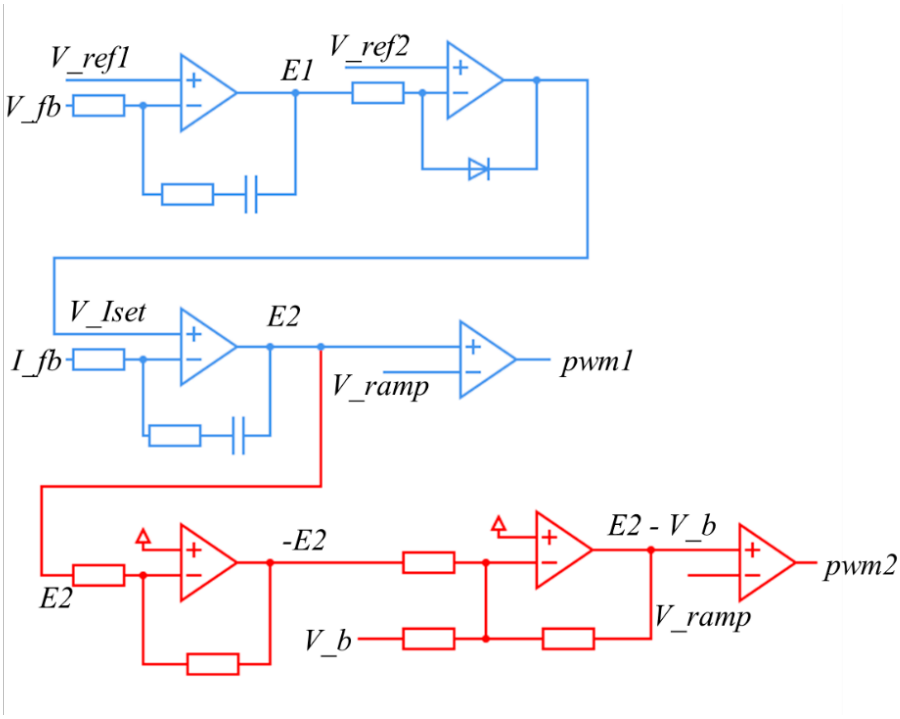


Рис. 2. Схема управления импульсным преобразователем

Таблица 1

Характеристики преобразователей напряжения, разработанных в ИЭЭ РАН

Тип преобразователя	Входное напряжение, В	Выходное напряжение, В	Мощность, кВт	КПД, %	Удельная мощность, Вт/кг
Пониж. /повыш. [6, 7]	130–300	150	10	97,5	3,8
Пониж. [5]	1000–1300	800	16	99	10
Пониж. / повыш. [8]	800–1300	800–1000	20	98	10

на пид-регуляторы, ШИМ-сигнал формируется микроконтроллером с помощью логических схем.

Небольшое количество элементов в схеме, применение современных быстродействующих карбид-кремниевых и даже кремниевых транзисторов позволяет проектировать устройства с малой массой и высокой эффективностью.

Потери в импульсных преобразователях напряжения

Потери в таких импульсных преобразователях условно можно разделить на потери в активных и пассивных элементах (индукторы и конденсаторы) (рис. 1) [5]:

$$P_l = P_{sw} + P_d + P_L + P_c.$$

Потери в транзисторах складываются из потери в проводящем состоянии, что обусловлено наличием сопротивления канала, и в процессе переходных процессов, что обусловлено наличие емкостей между выводами транзисторов. Мощность потерь в диодах Шоттки обусловлена только потерями на проводимость. Мощность потерь в дросселе состоит из мощности потерь в сердечнике, мощности резистивных потерь в проводах и мощности потерь в проводах с учетом скин-эффекта. Мощность потерь в конденсаторах можно найти через фактор рассеяния.

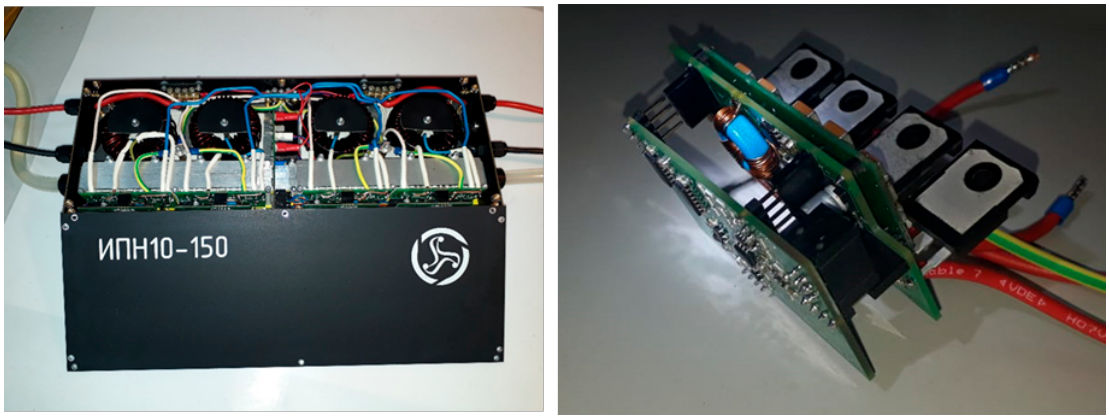
Преобразователи постоянного напряжения, разработанные в Институте электрофизики и электроэнергетики РАН

В Институте электрофизики и электроэнергетики РАН (ИЭЭ РАН) по данной схеме разработан ряд импульсных преобразователей [6–9], которые могут быть использованы для заряда аккумуляторов во время движения электрического транспортного средства. Высокая удельная плотность мощности позволяет использовать их на борту летательных аппаратов.

В табл. 1 представлены характеристики разработанных устройств.

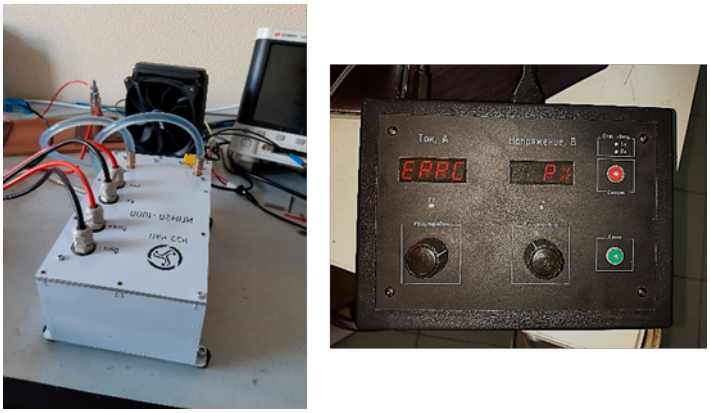
Преобразователь, работающий с напряжением на шине 150 В, имеет модульную структуру. Он состоит из четырех модулей по 2,5 кВт (рис. 3). Управление полностью аналоговое.

Остальные два приведенных в таблице преобразователя напряжения собраны на карбид-кремниевых транзисторах. Управление в них уже частично цифровое. Кроме того, понижающее-повышающий преобразователь управляется по оптоволокну с пульта дистанционного управления (рис. 4).



а) б)

Рис. 3. Понижающий/повышающий преобразователь мощностью 10 кВт с выходным напряжением 150: а) преобразователь, б) один модуль на 2,5 кВт



а) б)

Рис. 4. Понижающий/повышающий преобразователь напряжения мощностью 20 кВт: а) преобразователь напряжения, б) пульт дистанционного управления

Заключение

Собранные по предложенной схеме преобразователи напряжения имеют высокий КПД, высокую удельную мощность и могут быть использованы для стабилизации напряжения на шине постоянного напряжения после электрохимических источников напряжения в составе полностью электрических и гибридных силовых установок транспортных средств, включая летательные аппараты.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках государственного задания и Соглашения № 075-15-2024-558.

Библиографический список

1. О переходе на «зеленую авиацию» / Б. С. Алёшин [и др.] // Электричество. 2023. № 2. С. 4–12.

2. Оптимизация архитектуры силовой установки гибридного летательного аппарата / А. Н. Варюхин [и др.] // Электричество. 2021. № 8. С. 4–12.

3. Projecting power converter specific power through 2050 for aerospace applications / C. Hall [et al.] // 2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo. 2022. P. 760–765.

4. *Мошкунов С. И., Хомич В. Ю., Шершунова Е. А.* Способ управления импульсным силовым понижающим преобразователем в режиме среднего тока. Патент РФ RU 2791909 – 2023.

5. Мощный импульсный преобразователь постоянного тока на карбид-кремниевых транзисторах / А. Н. Варюхин [и др.] // Прикладная физика. 2021. № 1. С. 75–81.

6. *Мошкунов С. И., Хомич В. Ю., Шершунова Е. А.* Повышающе-понижающий преобразователь напряжения для заряда аккумуляторной батареи на борту электрического самолета // Письма в Журнал технической физики. 2020. Т. 46. № 15. С. 22–24.

7. Силовой многофазный импульсный преобразователь для гибридных летательных аппаратов / А. Н. Варюхин [и др.] // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2019. № 6. С. 121–129.

8. Мощный преобразователь напряжения для заряда АКБ на борту летательного аппарата с гибридной силовой установкой / А. Н. Варюхин [и др.] // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2022. № 1. С. 63–68.

ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 62-838 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-349-351**

А. В. Зенин*,*
аспирант
А. А. Мартынов*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***ООО «Научно-исследовательский экспертный центр инновационных технологий «ИНТЕХЭКСПЕРТИЗА»*

АНАЛИЗ СПОСОБОВ РЕАЛИЗАЦИИ ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

В данной статье рассмотрены вопросы реализации позиционных электроприводов и проблемы, возникающие при их использовании; предложен способ построения позиционной системы через задание профиля потенциальной энергии вала.
Ключевые слова: *потенциальная энергия, магнитная система, позиционирующие устройства.*

A. V. Zenin*,*
PhD Student
A. A. Martynov*
PhD, Tech., Associate Professor
**Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, LLC «Research Expert Center for Innovative Technologies «INTEKHEKSPERTIZA»*

ANALYSIS OF METHODS FOR IMPLEMENTING A POSITIONAL ELECTRIC DRIVE USING PERMANENT MAGNETS

This article discusses the implementation of positional electric drives, the problems that arise when using them, and proposes a method for constructing a positional system by setting the potential energy profile of the shaft.
Keywords: *potential energy, magnetic system, positioning devices.*

Позиционные электроприводы используются в системах с перемещением отдельных элементов в определенное положение. Они могут строиться на основе электродвигателя и системы обратной связи по положению [2, 3]. В качестве электродвигателя могут использовать ДПТ (двигатель постоянного тока) (коллекторные и бесколлекторные) либо шаговые. Для некоторых случаев шаговые двигатели могут использоваться без обратной связи из-за принципа работы (можно обеспечивать перемещение в заданное положение определенным количеством импульсов). Недостатками данных систем являются: люфт механизмов, ограничения следящих механизмов (энкодеров), дискретность перемещения (для шаговых двигателей) [6]. Также почти все двигатели имеют редукторы, в которых люфт внутренних частей является неустранимой проблемой [6]. Можно повысить точность изготовления, использовать более совершенные материалы и сплавы, но все это приводит повышенной стоимости и/или массогабаритам редуктора. Но существуют задачи, где данные решения неприменимы, где недопустимо использование редукторов большой массы, а себестоимость изготовления является критическим фактором. Примером является система, установленная на роботе, которая должна отслеживать положение неких небольших объектов в небе (к примеру, звезд). Для решения этой проблемы можно применить несколько иной принцип управления, который обеспечит более высокую точность и позволит избежать использования редукторов в электроприводе.

В данной статье предлагается метод управления электродвигателем, основанный на вычислении потенциальной энергии вала электродвигателя, которая зависит от взаимного расположения обмоток статора и вала, а также токов в этих обмотках. Меняя ток, протекающий в обмотках, по направлению и модулю, с помощью комбинации нескольких катушек, можно задать профиль потенциальной энергии вала, который не будет меняться дискретно. В данном случае потенциальная энергия вала рассматривается как энергия взаимного расположения элементов системы, где изменяются не только взаимное расположение обмоток статора и ротора, но и протекающие в них токи, которые изменяют магнитное поле.

Самая наглядная демонстрация данного принципа – магнитные диполи. Магнитный диполь во внешнем поле всегда стремиться сориентировать свой магнитный момент с направлением индукции магнитного поля. Причем диполь обладает потенциальной энергией поворота в этом поле [4, 5]. С точно таким же принципом можно рассмотреть и ротор двигателя как один диполь либо их систему, тогда так статор создает неравномерное внешнее (по отношению к ротору) магнитное поле. Изменяя ток в катушках статора, можно это магнитное поле изменить так, чтобы ротор вставал в нужное положение. Проблема возникает при расчете данного положения и в контроле токов катушек. Для обеспечения точного позиционирования необходимо большое число таких катушек (полюсов) с независимым управлением и достаточно мощное вычислительное устройство, которое сможет это контролировать. На данном этапе развития технологий создать устройство с множеством независимых каналов управления и мощной цифровой обработкой не является затруднением. Однако возникает проблема математическая: необходимо подобрать метод управления, подходящий под данные задачи. Именно в этом может помочь потенциальная энергия.

По данной теме мало публикаций, но есть один прототип двигателя со спиральным ротором, где использовали похожий принцип расчета энергии, некоторые моменты из которого приведены далее.

На вал действует сумма сил (1) со стороны поля, которая пытается сориентировать его магнитный момент с направлением магнитного поля, сила которого определяется (2) [1].

$$N = [p_m B]; \tag{1}$$

$$F_\theta = M \cos\varphi \cdot \frac{dB}{d\theta}, \tag{2}$$

где N – сумма действующих сил; p_m – магнитный момент; θ – угловое смещение; φ – угол между моментом и магнитной индукцией; M – суммарный магнитный момент.

Работу можно выразить как (3) [1]:

$$F = \nabla U = \nabla(M * B). \tag{3}$$

При взятии градиента скалярного произведения (2) получим в полярных координатах [1]:

$$F = \frac{M}{r}\frac{\partial B_r}{\partial \theta} + M\frac{\partial B_r}{\partial r}; \tag{4}$$

$$T = F * r, T = M\frac{\partial B_r}{\partial \theta}, \tag{5}$$

где U – потенциальная энергия; r – радиус статора; T – момент; B_r – радиальная магнитная индукция.

Частная производная индукции поля по радиусу равна 0, так как движение ротора происходит только в окружном направлении, т. е. радиус не меняется.

Если решить в отношении U уравнение (3), то получится, что

$$U = M_r * B_r + M_\theta * B_\theta \tag{6}$$

Однако, магнитный момент по окружности должен быть равен 0 [1], тогда потенциальная энергия будет определяться:

$$U = M_r \cdot B_r. \tag{7}$$

Соответственно, из классической механики можно вывести с помощью уравнения (3) [1]:

$$A = \int T d\theta = \int M dB_r, \tag{8}$$

где A – работа.

Конкретно данные расчеты применили к спиральному двигателю, исследователи по итогу экспериментов построили график зависимости потенциальной энергии вала от поворота двигателя при разных диаметрах ротора [1]. Как говорилось ранее, сам по себе спиральный двигатель в данной статье неинтересен, но расчет потенциальной энергии представляет особенный интерес, так как это является нетипичным и непопулярным параметром в электродвигателях.

Для удобного управления в конкретный момент времени, зная токи, а следовательно, индукцию катушек, можно построить график потенциальной энергии вала в магнитном поле, пример представлен на рис. 1.

Каждому углу поворота φ ротора будет соответствовать определенная потенциальная энергия. Ротор всегда будет стремиться к ми-

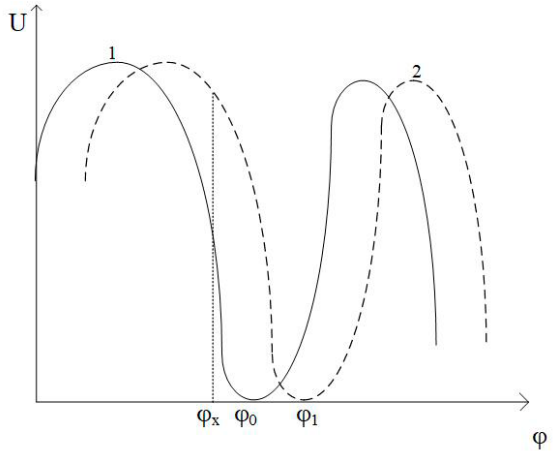


Рис. 1. График зависимости энергии от угла в двух положениях

нимуму энергии. Если изменить токи в обмотках, можно сдвинуть график, тому предыдущему углу будет соответствовать другая энергия, ротор снова будет стремиться к минимуму. Таким образом, постоянно меняя график, можно задать скорость перемещения. А изменяя уровень энергии в конкретном угле с помощью регулировки токов в обмотках, можно задать точность в теории и момент, который может развивать ротор (так как момент определяется градиентом потенциальной энергии).

Предположим, что заданы определенные токи и расчет дал график под позицией 1. Вал находится в положении φ_x. Он будет стремиться к положению φ_0, где ему будет соответствовать минимум энергии. Изменив токи, U будет описываться кривой 2. Тогда положению φ_x и φ_0 будет соответствовать более высокая энергия, вал уже будет стремиться к положению φ_1. Соответственно, двигая график с определенной скоростью, будет меняться положение минимума, таким образом можно задать скорость. Разово меняя токи, можно выставить определенный угол, в который встанет вал, причем это изменение не будет ограничено дискретизацией, угол выставляется плавно. В теории, одному положению могут соответствовать токи различных величин, так как их модуль задает уровень энергии, а форму определяет уже взаимное расположение статоров и разность в величинах этих токов, направлениях. Тогда самим уровнем можно ограничить момент, который может развивать двигатель. Если проследить за изменением энергии, то есть следовать по графику 1 из положения φ_x в положение φ_1, то до φ_0 угла энергия будет расходоваться на перемещение вала, потенциальная энергия будет убывать. Положение φ_0 соответствует минимуму энергии, вал там остановится. Если не менять токи, то чтобы переместиться в положение φ_1, необходимо приложить внешнюю силу, начать расходовать энергию, совершать работу против сил, которые вал удерживают. Тогда потенциальная энергия будет расти.

Подводя итоги, можно отметить, что применение данного подхода открывает возможности:

1) плавно перемещать вал двигателя с большой точностью;

2) снизить люфт в одном положении угла двигателя;

3) установить ограничение на критические, максимальные моменты, которые может развить двигатель;

4) меняя ток в катушках (и магнитное поле), можно задать скорость перемещения и получить конечное положение привода.

Возникают потребности в исследованиях для реализации идеи:

1. Необходимо будет провести расчет нового типа двигателя с большим количеством независимых полюсов ротора и статора.

2. Для управления необходимо будет создать драйвер контроля каждой катушки и методики расчета, программное обеспечение для компьютерной системы.

Библиографический список

1. *Thomas F.* Valone Permanent Magnet Spiral Motor for Magnetic Gradient Energy Utilization: Axial Magnetic Field // Space, Propulsion & Energy Sciences International Forum. Beltsville, 2010.

2. *Павлов Е. С., Тутаев Г. М.* Особенности управления позиционными двигателями двойного питания // Огарев-online. 2023. № 15. URL: https://journal.mrsu.ru/arts/osobennosti-upravleniya-pozicionnymi-dvigatelyami-dvojnogo-pitaniya.

3. Исследование способов реализации позиционного электропривода переменного тока / М. Н. Алеко, В. С. Карачев, Д. А. Котин // Труды Международной шестнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока», [г. Екатеринбург], 05–09 октября 2015 г. Екатеринбург: [УрФУ], 2015. С. 171–174.

4. *Коваленко И. И.* Курс физики: учеб. пособие: в 6 ч. Ч. 3: Электричество и магнетизм. СПб.: ГУАП, 2020. 143 с.

5. *Иродов И. Е.* Электромагнетизм. Основные законы. 1-е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 320 с.

6. Электрические машины: учебник для вузов. В 2-х т. Том 2. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 532 [4] с.: ил.

УДК 621.039.67 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-352-356**

А. Д. Колесова*
аспирант
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОКАМАКОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Приведен сравнительный анализ основных характеристик электромагнитных систем выбранных десяти установок типа «токамак».
Ключевые слова: *токамак, управляемый термоядерный синтез.*

A. D. Kolesova*
PhD Student
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF TOKAMAKS WITH DIFFERENT TYPES OF ELECTROMAGNETIC SYSTEMS

A comparative analysis of the main characteristics of electromagnetic systems of ten selected tokamak-type installations is presented.
Keywords: *tokamak, controlled thermonuclear fusion.*

Прогресс развития человечества тесно связан с развитием энергетики, потребность в которой до сих пор удовлетворялась за счет сжигания органического топлива в большей мере, что приводит к осложнению экологических проблем и истощению экономических ресурсов в будущем.

Возобновляемые источники энергии не могут считаться в полной мере основой глобальной энергетики, так как не могут полностью заменить традиционные методы получения энергии [1].

Атомная энергетика использует для получения энергии реакцию деления тяжелых ядер на более легкие. Термоядерная энергетика, в свою очередь, использует обратную реакцию синтеза легких ядер изотопов водорода для получения более тяжелых ядер. Топливо же для ядерных и термоядерных электростанций более энергоемко и более экологично из-за отсутствия выбросов в атмосферу, а также почти отсутствует проблема его транспортировки.

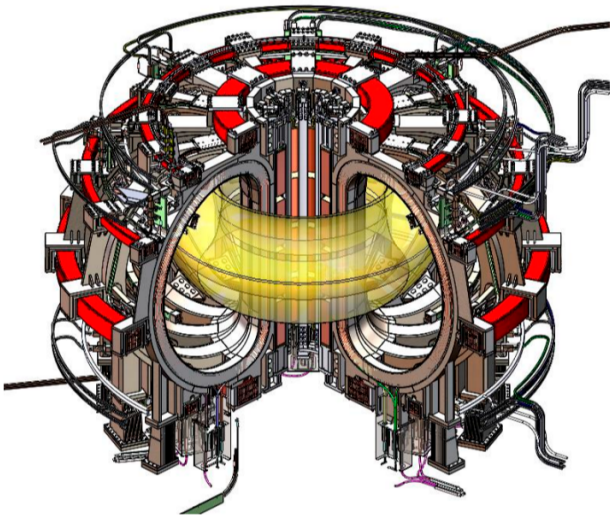
Ядерный синтез – это слияние двух легких атомных ядер в одно более тяжелое с выделением большого количества энергии. Такие реакции происходят в плазме – горячем заряженном газе из положительных ионов и электронов. Звезды, включая Солнце, используют эту реакцию для получения энергии [2].

В Солнце ядра сталкиваются при температуре около 10 млн градусов по Цельсию, что позволяет им преодолеть электрическое отталкивание и слиться, благодаря ядерной силе притяжения. Для этого ядра должны быть ограничены небольшим пространством.

Термоядерный синтез вырабатывает в 4 раза больше энергии на килограмм топлива, чем деление, используемое на атомных электростанциях, и почти в 4 млн раз больше энергии, чем сжигание нефти или угля.

В основе функционирования большинства разрабатываемых термоядерных реакторов лежит использование реакции смеси дейтерия и трития, дейтерий-дейтерия и дейтерий-гелий3. Эти вещества, в небольшом количестве, способны генерировать колоссальный объем энергии, сравнимый с тем, который один человек в развитой стране потребляет в течение 60 лет.

Существует большое многообразие установок для управляемого термоядерного синтеза, где одной из наиболее технически проработанных концепций, направленных на получение энергии, путем использования термоядерной реакции, является установка типа «токамак», показанная на рисунке. Суть установки заключается в стабилизации плазмы внутри «тороидальной» вакуумной камеры с помощью магнитных полей.



Токамак

В современном мире существует множество установок для магнитного удержания плазмы типа «токамак», и провести сравнительный анализ абсолютно всех токамаков мира достаточно затруднительно.

С момента создания первых токамаков прошло уже около 70 лет, но эти устройства продолжают развиваться и совершенствоваться. Каждая новая конфигурация токамака с появлением новой идеи заставляет ученых все больше и больше усовершенствовать свои установки. Это связано с тем, что токамаки являются перспективными устройствами для осуществления управляемого термоядерного синтеза, который может стать источником энергии будущего [3].

В настоящее время в мире насчитывается несколько сотен токамаков, которые различаются по размеру, конфигурации и другим параметрам. Можно выделить некоторые общие тенденции в развитии токамаков, о которых речь пойдет далее.

Таким образом, токамаки продолжают развиваться, чтобы стать источниками энергии будущего, имея ряд преимуществ перед другими способами получения энергии. Токамак состоит из следующих основных компонентов:

Вакуумная камера в форме тора, внутри которой удерживается плазма, тем самым обеспечивая изоляцию плазмы от окружающей среды.

Магнитные катушки, создающие магнитное поле для удержания плазмы. Они расположены вокруг вакуумной камеры и вырабатывают сильное магнитное поле, которое удерживает плазму в центре камеры. Тороидальные, полоидальные катушки, совместно с центральным соленоидом образуют так называемую электромагнитную систему.

Система нагрева плазмы, которая используется для достижения высоких температур, необходимых для термоядерных реакций. Это может быть сделано с помощью различных методов, таких как инжекция нейтральных частиц или использование радиочастотного излучения.

Системы диагностики и управления, позволяющие отслеживать параметры плазмы и работу токамака в целом. Они используются для измерения температуры, плотности, давления и других параметров плазмы, а также для мониторинга работы токамака.

Криогенная система, предотвращающая перегрев систем.

В выборке участвовали такие установки [4], как:

Глобус-М2 (г. Санкт-Петербург) – экспериментальная термоядерная установка типа токамак, предназначенная для изучения физических процессов в плазме и отработки технологий управляемого термоядерного синтеза. Установка позволяет исследовать взаимодействие плазмы со стенками камеры и отрабатывать методы ее нагрева. В ходе экспериментов на данной установке была получена рекордная для сферических токамаков плотность плазмы. Основной целью программы «Глобус-М2» является создание научно-технологической основы для компактных термоядерных реакторных систем, компактных термоядерных источников нейтронов и гибридных систем термоядерного синтеза и деления.

Т-11М (г. Троицк) – малогабаритный токамак с применением жидкометаллических литиевых технологий на основе капиллярно-пористых систем и системой сбора лития в скрепслое. Основным назначением Т-11М является проведение на нем исследований ионно-циклотронного нагрева плазмы, материалов первой стенки и их защиты.

Т-15МД (г. Москва) – крупнейший в России токамак с вытянутой плазмой, оснащенный дивертором, системой длительного импульса и мощным нагревом. Имеет теплую магнитную систему. Т-15МД пришел на смену устаревшим моделям Т-10 и Т-15, в которых плазма имела круглое сечение. Необходимость такой замены обусловлена тем, что для включения экспериментов в базу данных ИТЭР требуются данные, полученные на токамаках именно с вытянутым сечением плазмы.

ТРТ (г. Троицк**)** – компактный стационарный токамак с высоким магнитным полем

в 8 Тл. В нем используется сверхпроводниковая электромагнитная система из высокотемпературного сверхпроводника, что делает ТРТ первой установкой в России, где будут использованы ВТСП-катушки для достижения высоких показателей поля. ТРТ разрабатывается как прототип для чистого термоядерного реактора и для термоядерного источника нейтронов для гибридного синтез-деление реактора [5, 6]. В 2024 г. был разработан эскизный проект установки ТРТ в АО «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова», а запуск установки запланирован на 2035 г.

KTM (Казахстан) – сферический токамак, основным назначением которого является исследование и испытание материалов, конструкторских решений для защиты первой стенки термоядерного реактора, разработка методов снижения тепловых нагрузок на дивертор, а также различных методов отвода тепла и энергии, включая способы быстрой откачки дивертора объема, разработка методов предотвращения неисправного выхода из строя внутрикамерных элементов. Конструкция дивертора, состоящая из пластин, обращенных к плазме, установленных на поворотном столе, является преимуществом для кампаний по испытанию материалов, позволяя быстро заменять пластины дивертора.

JT-60SA (Япония) – полностью сверхпроводящий токамак, способный удерживать высокотемпературную дейтериевую плазму. Модифицированная версия JT-60U. Он может работать как с одинарным, так и с двойным дивертором, а также с широким диапазоном форм плазмы и соотношений сторон. В 2018 году на установке JT-60SA был установлен мировой рекорд по объему плазмы в 160 кубических метров.

WEST (Франция) – модернезированная версия токамака Tore Supra, который раньше имел круглое сечение плазмы. Сверхпроводящий токамак, оснащенный двумя симметричными дивертарами «вверх-вниз», данная система позволит изучать различные конфигурации дивертора (однонулевого или двойного). Компоненты, обращенные к плазме, на WEST изготовлены из вольфрама. В 2024 г. на токамаке WEST, были достигнуты рекордные показатели по времени удержания плазмы температурой 50 млн градусов в течение 6 мин.

EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) (Китай) – расположен в Институте физики плазмы Китайской академии наук. Цель проекта – способствовать исследованиям в области физики плазмы и предоставить научную основу для проектирования и строительства экспериментальных реакторов, включая ITER. EAST обладает вытянутым поперечным сечением, полностью сверхпроводящей магнитной системой, а также охлаждаемыми водой внутрикамерными компонентами. В январе 2025 г. на токамаке EAST, были достигнуты рекордные показатели по времени удержания плазмы температурой около 100 млн градусов по Цельсию в течение 17 мин.

KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) (Республика Южная Корея) – токамак среднего размера со сверхпроводящей магнитной системой из Nb3Sn, активно охлаждаемыми внутрикамерными компонентами и длинноимпульсным неиндуктивным нагревом и током. Устройство может обеспечить высокую производительность работы благодаря пассивному стабилизатору, катушкам управления внутри сосуда и сильным функциям формирования плазмы. В 2022 г. на KSTAR были достигнуты рекордные, на тот момент, показатели по времени удержания стабильной плазмы температурой 100 млн Кельвинов в течение 30 с.

JET (Joint European Torus) (Европа) – объединенный европейский токамак, расположенный в Калхэмском центре термоядерной энергии в Великобритании. В 2023–24 гг. на установке в заключительном для JET эксперименте был получен рекордный объем выработанной энергии в 69 МДж при использовании всего 0,2 мг топлива за 6 с.

ST-40 (Великобритания) – компактный сферический коммерческий токамак с высокотемпературной сверхпроводящей магнитной системой, в которой применяется ВТСП-2 лента толщиной 0,1 мм типа REBCO. Основная цель ST-40 – доказать возможность коммерческой выработки термоядерной энергии с помощью компактных сферических токамаков. В 2023 г. на ST-40 была получена рекордная для сферических токамаков температура в 100 млн Кельвинов.

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) – международный экспериментальный термоядерный реактор, строящийся во Франции, который объединил в себе наработки Российской Федерации, Китая, Индии, Японии, Южной Кореи, США, Швейцарии, Великобритании и стран Европейского союза. По состоянию на май 2022 г. его строительство завершено примерно на 75%, с успешными испытаниями многих ключевых компонентов, таких как сектора вакуумной камеры, катушки тороидального поля, катушки полоидального поля, секции криостата и тепловые экраны.

SST-1 (Индия) – это токамак среднего размера со сверхпроводящими тороидальными ка-

тушками, работающими в двухфазном гелии в криогенных условиях. Недавние модификации системы внешних омических катушек позволили получать повторяемую и последовательную омическую плазму с предварительной ионизацией с помощью электронного циклотрона.

DDT (Италия) – будет сверхпроводящим токамаком. Он будет иметь конфигурацию дивертора, которая может работать в сценариях с однонулевым и двойным дивертором, а также ряд усовершенствованных конфигураций дивертора. Максимальная производительность вспомогательной тепловой мощности составит 45 МВт.

SPARC (США) будет представлять собой компактный токамак с сильным полем в 12 Тл на оси плазмы, работающий на дейтериевом и тритиевом топливе. Он будет иметь вольфрамовую первую стенку и высокотемпературные сверхпроводящие магниты. В дополнение к умеренному омическому нагреву, SPARC будет полагаться на ионно-циклотронный резонансный нагрев. На данном этапе проводятся испытания тороидальной катушки с ВТСП-2.

Подробнее о характеристиках представленных установок – в таблице.

Изначально плазма в основном имела круглое сечение, а в конструкциях использовали так называемую «теплую» резистивную электромагнитную систему. Примерами таких установок могут служить ГЛОБУС-М2 и Т-10.

Со временем вектор исследований сместился в сторону изучения устройств с вытянутой плазмой. Международное термоядерное сооб-

Таблица

Основные характеристики мировых установок типа токамак

Название установки	Страна	Большой радиус плазмы, R (м)	Малый радиус плазмы, a (м)	Аспектное отношение, R/a	Тороидальное магнитное поле на оси плазмы, (Тл)	Ток плазмы, (МА)	Конфигурация по форме	Тип магнитной системы
ГЛОБУС-М2	Российская Федерация	0,36	0,24	1,5	1	0,5	Сферический	«Теплый»
Т-15 МД	Российская Федерация	1,48	0,67	2,2	2	2	D – образный	«Теплый»
Т-11М	Российская Федерация	0,7	0,2	3,5	1	0,1	D – образный	«Теплый»
ТРТ	Российская Федерация	2,15	0,57	3,77	8	5	D – образный	Сверхпроводящий (ВТСП)
КТМ	Казахстан	0,9	0,45	2	1	0,75	D – образный	«Теплый»
JT-60SA	Япония	3	1,18	2,5	2,7	5,5	D – образный	Сверхпроводящий (НТСП)
WEST	Франция	2,5	0,5	5	3,7	1	D – образный	«Теплый»
EAST	Китай	1,7	0,4	4,37	3,5	1	D – образный	Сверхпроводящий (НТСП)
KSTAR	Республика Корея	1,8	0,5	3,6	3,5	2	D – образный	Сверхпроводящий (НТСП)
JET	Великобритания	2,96	2,10/ 1,25	1,4/ 2,4	3,45	3,2-4,8	D – образный	«Теплый»
ST-40	Великобритания	0,5	0,3	1,7	3	2	Сферический	Сверхпроводящий (ВТСП)
ITER	Международный проект	6,2	2	3,1	5,3	15	D – образный	Сверхпроводящий (НТСП)
SST-1	Индия	1,1	0,2	5,5	1,5	0,1	D – образный	Сверхпроводящий (НТСП)
DTT	Италия	2,19	0,7	3,2	6	5,5	D – образный	Сверхпроводящий (НТСП)
SPARC	Соединенные Штаты Америки	1,85	0,57	3,1	12	8,7	D – образный	Сверхпроводящий (ВТСП)

Примечание: НТСП – низкотемпературные сверхпроводники; ВТСП – высокотемпературные сверхпроводники.

щество пришло к выводу, что у токамаков с круглым сечением нет перспектив использования в реакторах.

Для дальнейшего развития экспериментальной физики и термоядерного синтеза в целом потребовалось перейти на использование сверхпроводящих обмоток. Применение сверхпроводников позволяет существенно снизить энергозатраты на создание электромагнитных полей, что дает возможность многократно увеличить конструкционную плотность тока в обмотках и магнитное поле, которое они генерируют.

Изначально в сверхпроводящих обмотках применялись исключительно низкотемпературные сверхпроводники (НТСП). Однако сейчас активно разрабатываются высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) для электромагнитных систем токамаков нового поколения, таких как российский ТРТ и американский SPARC. Это открывает новые перспективы для повышения эффективности и надежности термоядерных установок.

Использование ВТСП в электромагнитных системах токамаков имеет ряд преимуществ:

– более высокая критическая температура, позволяющая работать при более высоких магнитных полях;

– большая плотность тока, обеспечивающая более сильное магнитное поле;

– меньшие потери энергии, снижающие энергопотребление установки.

Разработка и внедрение ВТСП-материалов в конструкции токамаков являются важным шагом на пути к созданию эффективных и экономически выгодных термоядерных реакторов.

Библиографический список

1. Основы проектирования магнитных термоядерных реакторов / А. Б. Алексеев [и др.]: под ред. Глухих В. А., Саксаганского Г. Л. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 613 с.

2. *Глухих В. А., Беляков В. А., Минеев А. Б.* Физико-технические основы управляемого термоядерного синтеза: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 348 с.

3. О программе Российских исследований в области управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий / В. И. Ильгисонис [и др.] // Физика плазмы. 2021. № 11.

4. World survey of fusion devices 2022. International Atomic Energy Agency. Description: Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022.

5. Инженерно-технические аспекты электромагнитной системы установки TRT / Э. Н. Бондарчук [и др.] // ФИЗИКА ПЛАЗМЫ. – 2021. – №12

6. Токамак с реакторными технологиями (TRT): концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики / А. В. Красильников [и др.] // Физика плазмы. 2021. № 11.

УДК 621.319.53 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-357-363**

Р. Ш. Еникеев*,*
кандидат технических наук
Б. Э. Фридман*,*
доктор технических наук
Ю. Л. Крюков*
ведущий инженер
М. В. Медведев*
инженер-программист
В. Г. Мускатиньев**
заместитель директора – главный конструктор
Д. Ю. Немаев**
инженер-конструктор
Н. Е. Нечаев*
инженер-исследователь
М. Е. Поддуев*
инженер-конструктор
Р. А. Серебров*
начальник лаборатории
А. А. Хапугин**
инженер-конструктор
**АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург*
***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
****ОАО «Элпресс», г Саранск*

КОНДЕНСАТОРНАЯ ЯЧЕЙКА ДЛЯ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ С ВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ

Конденсаторная ячейка с запасаемой энергией 36 кДж предназначена для работы с частотой повторения импульсов 1 Гц в составе стационарного емкостного накопителя энергии. Коммутация разрядного тока в ячейке осуществлена блоком коммутаторов, составленных из RSD, блокирующих и кроубарных диодов. В ячейке обеспечено принудительное жидкостное охлаждение полупроводниковых приборов.
Ключевые слова: *емкостной накопитель энергии, конденсаторная ячейка, импульсный ток, частота повторения импульсов, полупроводниковый коммутатор, реверсивно-включаемый динистор.*

R. Sh. Enikeev*,*
PhD, Tech.
B. E. Fridman*,*
Dr. Sc., Tech.
Yu. L. Kryukov*
Leading Engineer
M. V. Medvedev*
Software Engineer
V. G. Muskatinev**
Deputy Director – Chief Designer
D. Yu. Nemaev*
Design Engineer
N. E. Nechaev*
Research Engineer
M. E. Podduev*
Design Engineer
R. A. Serebrov*
PhD, Tech.
A. A. Khapugin**
Design Engineer
**Join Stock Company "D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus", St. Petersburg*
***St. Petesrburg State University of Aerospace Instrumentation*
****Join-Stock Company "Elpress", Saransk*

CAPACITOR CELL FOR A CAPACITIVE ENERGY STORAGE DEVICE WITH A HIGH PULSE REPETITION RATE

The capacitor cell with stored energy 36 kJ is intended for work with pulse repetition rate 1 Hz in the stationary capacitive energy store. Discharge current switching is provided by the semiconductor commutator unit which includes the RSD switches, blocking and crowbar diodes. There is forced liquid-cooling of the semiconductor devices in the capacitor cell.

Keywords: *capacitive energy storage, capacitor cell, pulses frequency, semiconductor switch, reverse switched dynistor.*

Современные большие емкостные накопители энергии, генерирующие токи в сотни и тысячи килоампер работают, как правило, в режиме одиночных импульсов тока. В этом режиме пауза между процессами генерации импульсов (заряда и импульсного разряда) достаточно велика, настолько, что элементы зарядных и разрядных контуров успевают отдать в окружающую среду тепло, выделившееся в них при прохождении электрического тока [1].

Области применения больших емкостных накопителей постоянно расширяются, и к настоящему времени появились потребители импульсной мощности, для которых необходима высокая частота повторения импульсов тока. Достижение высокой частоты следования импульсов тока амплитудой в сотни и более килоампер возможно при поочередном разряде нескольких конденсаторных батарей, а также при использовании конденсаторных ячеек, имеющих систему принудительного охлаждения и допускающих работу в высоком темпе.

В настоящей статье описывается конденсаторная ячейка, предназначенная для работы в стационарном источнике импульсов тока, в котором реализованы оба указанных способа обеспечения работоспособности при высокой частоте следования импульсов:

– Источник должен генерировать импульсы тока, амплитудой до 300 кА с частотой повторения до 10 Гц. Он составлен из 10 конденсаторных батарей, которые разряжаются поочередно, каждая с частотой повторения импульсов $f = 1$ Гц.

– В конденсаторных ячейках каждой конденсаторной батареи выполнена система принудительного охлаждения, которая позволяет работать ячейкам с частотой повторения импульсов $f = 1$ Гц.

1. Параметры ячейки

Источник импульсов тока, в состав которого входит конденсаторная ячейка, предназначен ли работы на дуговую нагрузку. Особенностью такой нагрузки является то, что падение напряжение на дуге может быть малым и режим разряда будет близок к режиму короткого замыка-

Таблица 1

Параметры ячейки

Параметр	Символ	Значение	Комментарий
Максимальная запасенная энергия	W_1	36 кДж	
Емкость	C	2 мФ	
Maximal charging voltage in the single pulse discharge mode Максимальное зарядное напряжение в режиме одиночного импульсного разряда	$U_{0,m}$	6 кВ	
Maximal charging voltage in the repetition discharge mode Максимальное зарядное напряжение в режиме повторного разряда	U_0	5 кВ	
Максимальный ток в режиме короткого замыкания	I_m	120 кА	$U_0 = 5$ кВ
Длина кабельной линии, соединяющей ячейку с нагрузкой	l	25 м	
Индуктивность разрядной цепи	$L \approx \frac{0,8^2 C U_0^2}{I_m^2}$	2.22 мкГн	Включая кабельную линию
Продолжительность непрерывной работы	t_w	20 мин	
Продолжительность рабочей паузы	t_p	4 ч	

Рис. 1. Секция конденсатора

ния. Поэтому конденсаторная ячейка должна быть рассчитана на длительную работу при коротком замыкании в нагрузке. При этом:

– Амплитуда импульса тока максимальна $I_m = 120$ кА,

– Вся запасенная в конденсаторах энергия выделяется в разрядном контуре ячейки.

Следовательно, конденсаторная ячейка должна выдерживать длительную работу (20 мин) с максимальной амплитудой разрядного тока; а также выделение в разрядном контуре в течение $t_p = 1200$ с с тепловой энергии $W_{1200} = 30$ МДж. (Эта энергия в основном выделяется в полупроводниковом коммутаторе разрядного тока и в индуктивных элементах кроубарного контура ячейки).

2. Конденсаторы

В ячейке применяются конденсаторы, разработанные и изготовленные компанией ООО «Элкод», Санкт-Петербург. К конденсаторам для частотного режима предъявляются требования малой индуктивности и малой величины tgδ. Для проверки нагрева будущих конденсаторов в частотном режиме были изготовлены и испытаны секции конденсаторов, составляющие 1/60 часть реального конденсатора (рис. 1):

Таблица 2

Параметры конденсаторной секции

Параметр	Символ	Значение
Максимальное напряжение	$U_{0,m}$	6 кВ
Емкость	C_s	16,7 мкФ
Коэффициент потерь на частоте $f = 100$ Hz	tgδ	0,0016
Эквивалентное сопротивление в последовательной схеме замещения	$R_s = \frac{\text{tg}\delta}{2\pi f C_s}$	0,153 Ω

На рис. 2 представлена электрическая схема испытаний конденсаторной секции, на рис. 3 – осциллограммы тока и напряжений при этих испытаниях. Интеграл действия импульса тока в конденсаторной секции $J_c = \int_0^{t_p} I_c^2 dt = 124{,}5\ \text{A}^2 c$ (рис. 3, *b*). Мощность

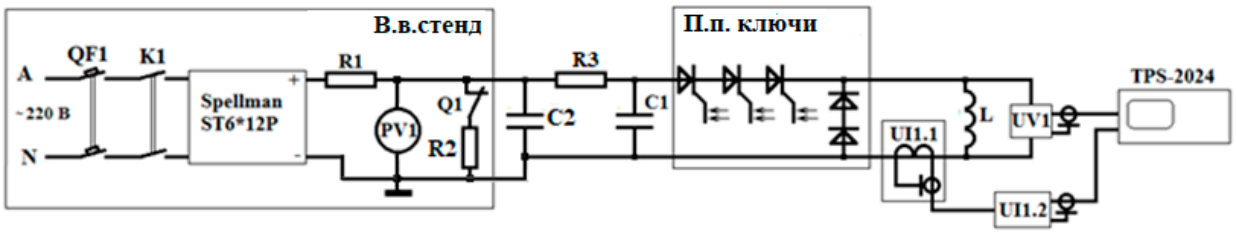


Рис. 2. Испытание секции конденсатора C1

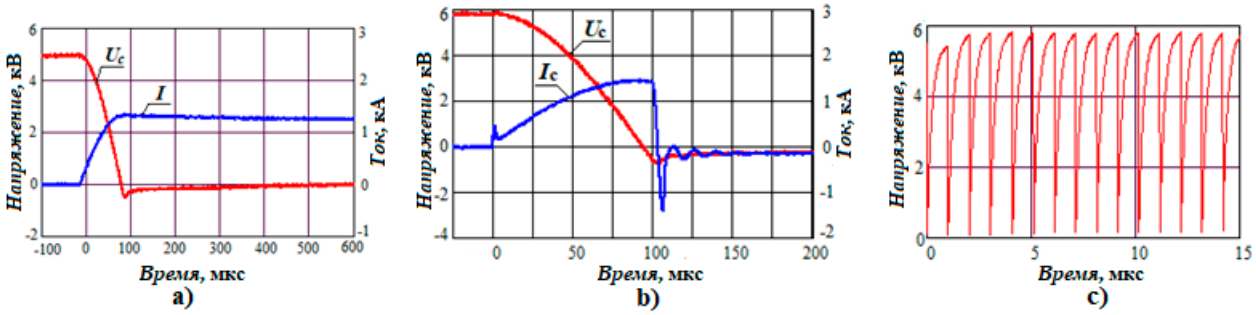


Рис. 3. Осциллограммы испытаний конденсаторной секции: U_c – напряжение конденсатора (красный), I – выходной ток (синий), I_c – ток конденсатора

Таблица 3

Параметры конденсаторов К75-88-6 кВ-1000 мкФ±10%

Параметр	Символ	Значение
Номинальное напряжение зарядки	U_0	6 кВ
Испытательное напряжение зарядки	U_{test}	6,5 кВ
Емкость	C	1 мФ ±10%
Тангенс угла потерь на частоте 100 Гц, не менее	tgδ	$1{,}6\cdot10^{-3}$
Амплитуда импульса разрядного тока, не более	I_m	60 kA
Интеграл действия импульса тока	$J_c = \int_0^{t_p} I_c^2 dt$	$0{,}28\times10^6$ А^{2}с
Ресурс (количество импульсов), не менее		10^6 импульсов
Габаритные размеры (длина × ширина ×высота)		420 × 270 × 440
Масса		50 кг

Рис. 4. Конденсатор К75-88-6 кВ-1000 мкФ±10%

тепловыделения в конденсаторной секции $N_c = J_c R_s f = 19$ Вт. При тестировании нагрев конденсаторных секций после 1200 импульсов с темпом 1 с не превышал 1,5°С.

Было испытано 2 секции 16,7 мкФ в объеме 14000 импульсов каждая. После испытаний значимых изменений емкости и tgδ не обнаружено. Подобные конденсаторные секции были применены в конденсаторах, изготовленных для конденсаторных ячеек.

В состав конденсаторной ячейки входит два конденсатора, параметры которых указаны в табл. 3. Каждый конденсатор имеет две составные части; у каждой части два резьбовых высоковольтных вывода (рис. 4).

3. Полупроводниковые коммутаторы

Полупроводниковые коммутаторы разработаны и изготовлены на Саранском заводе «Электровыпрямитель».

В частотном режиме работы в полупроводниковых приборах выделяется достаточно много тепла. Для отбора этого тепла в блоке коммутаторов применены жидкостные охладители.

На первых этапах разработки рассматривались два варианта устройства полупроводниковых коммутаторов: на основе мощных импульсных фототиристоров (LTT) [2] и на основе Реверсивно включаемых динисторов (RSD) [3]. В конечном счете были выбраны коммутаторы на основе RSD, так как у них меньше потерь энергии, то есть меньше выделение тепла при прохождении импульсного тока (меньше время включения и меньше падение напряжения в проводящем состоянии) [4].

Конденсаторная ячейка должна работать на общую нагрузку совместно с другими подобными ячейками. Для того, чтобы исключить самопроизвольное срабатывание RSD при разряде других конденсаторных ячеек, включена последовательно с RSD сборка высоковольтных диодов (блокирующих диодов), предотвращающих протекание встречного тока через полупроводниковые ключи конденсаторной ячейки. Также, для исключения колебательного режиме разряда конденсаторов в состав блока коммутатора входит сборка кроубарных диодов.

Для запуска RSD необходимо генерировать импульс напряжения амплитудой не меньше, чем 7 кВ. В составе конденаторной ячейки имеется импульсный генератор для запуска RSD. Этот генератор также собран на RSD.

Для того чтобы исключить шунтирование запускающего импульса, необходимо в разрядном контуре иметь дроссель насыщения L1 (рис. 8). Дроссель имеет один виток – медный

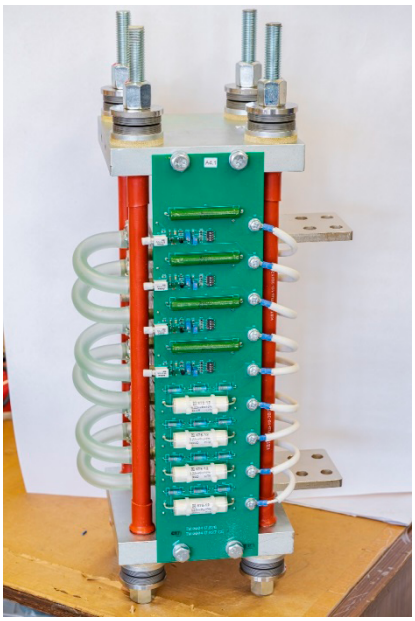


Рис. 5. Блок RSD и блокирующие диоды

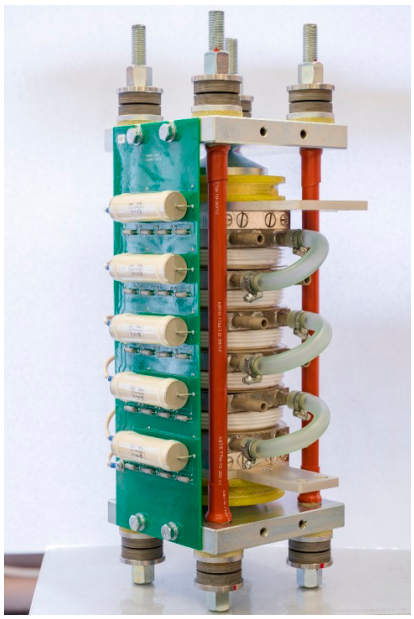


Рис. 6. Сборка кроубарных диодов

Рис. 7. Генератор запуска

Рис. 8. Дроссель насыщения

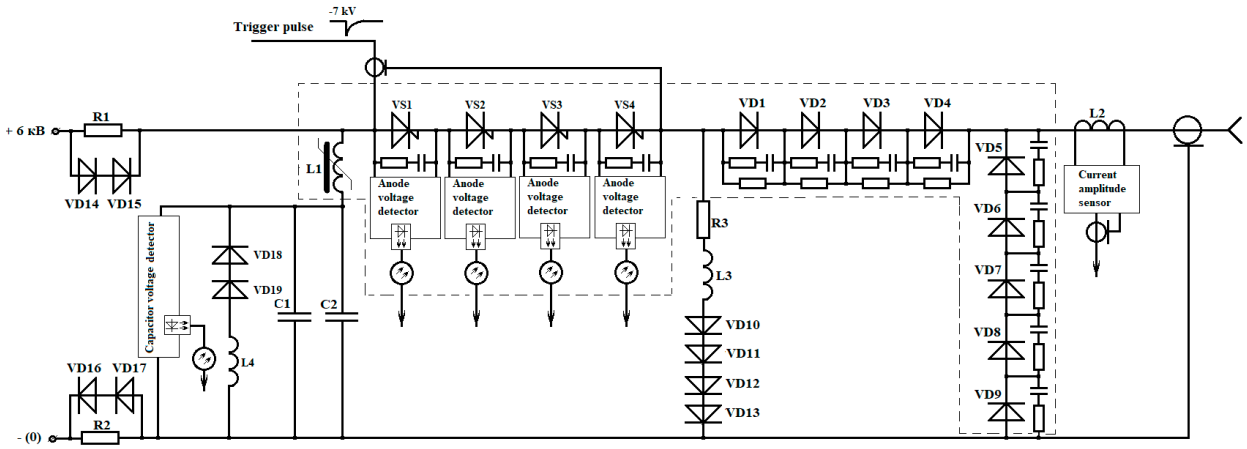


Рис. 9. Схемы конденсаторных ячеек

Таблица 4

Элементы схемы конденсаторной ячейки (рис. 9)

Символ	Обозначение	Количество	Комментарий
C1, C2	Конденсатор К75-88-6 кВ-1000мкФ±10%	2	
L2	Катушка Роговского датчика амплитуды тока	1	
L3	Катушка цепи гарантированного разряда	1	
L4	Катушка цепи рекуперации	1	
R1, R2	Балластные резисторы	2	
R3	Резистор цепи гарантированного разряда	1	
VD10 – VD13	Диоды цепи гарантированного разряда	4	
VD14 – VD17	Шунтирующие диоды	4	
VD18, VD19	Диоды схемы рекуперации	2	
Блок полупроводникового коммутатора (ограничен штриховой линией)			
L1	Дроссель насыщения	1	Рис. 8
VS1 – VS4	RSD ключи, РВД373-250-20	4	Рис. 5
VD1 – VD4	Блокирующие диоды, ДЛИ273-5000-20	4	Рис. 5
VD5 – VD9	Кроубарные диоды, ДЛ193-8000-20	5	Рис. 6
	Радиатор жидкостного охлаждения ОМ107	9	Для VS1–VS4, VD1-VD4
	Радиатор жидкостного охлаждения ОМ109	6	Для VD5-VD9

стержень внутри массивного магнитопровода, сделанного из аморфного нанокристаллического сплава. Перемагничивание магнитопровода обеспечивается зарядным током ячейки.

4. Схема конденсаторной ячейки

На рис. 9 представлена электрическая схема конденсаторной ячейки; штрихпунктирным контуром выделены элементы схемы, входящие в состав полупроводникового коммутатора.

При работе конденсаторной ячейки в емкостном накопителе энергии возможно появление со стороны нагрузки импульсов напряжения, которые могут вызвать паузу тока в RSD. Повторное появление тока в RSD после паузы может привести к повреждению полупроводниковых ключей, так как во время паузы тока концентрация носителей тока уменьшается. Для исключения этого в состав ячейки введена цепь гарантированного разряда, которая обеспечивает протекание через RSD небольшого тока во время возможных пауз.

Работа с высокой частотой повторения импульсов требует применения в конденсаторной ячейке аппаратных средств автоматической диагностики. Эти средства следующие [5]:

– Датчик амплитуды разрядного тока. Состоит из катушки Роговского L2, охватывающую выходную шину ячейки, и блока амплитудного детектора. После импульса разрядного тока на выводах амплитудного детектора появляется сигнал – напряжение, пропорциональное амплитуде импульса разрядного тока, который считывается цифро-аналоговым преобразователем ПЛК и позволяет системе управления проверить функционирование ячейки.

– Детектор напряжения конденсатора. Подключен параллельно импульсным конденсаторам C1 и C2. При заряде и достижении на конденсаторах заданного порогового напряжения детектор напряжения конденсатора вырабатывает оптический логический сигнал, который поступает на вход ПЛК и свидетельствует о нормальном завершении процесса заряда конденсаторов. У детектора напряжения конденсатора имеется 4-разрядный переключатель, с помощью которого устанавливается значение заданного порогового напряжения.

– Четыре детектора анодного напряжения. Подключены параллельно каждому RSD в сборке блока полупроводникового коммутатора. Функции и устройство этих детекторов аналогичны детектору напряжения конденсатора, но диапазон напряжения в четыре раза меньше. Детекторы анодного напряжения позволяют системе управления ЕНЭ контролировать исправность RSD.

5. Прототип конденсаторной ячейки

Фотография прототипа ячейки конденсаторной приведена на рис. 10.

Прототип конденсаторной ячейки был изготовлен, налажен и испытан. Типичные ос-

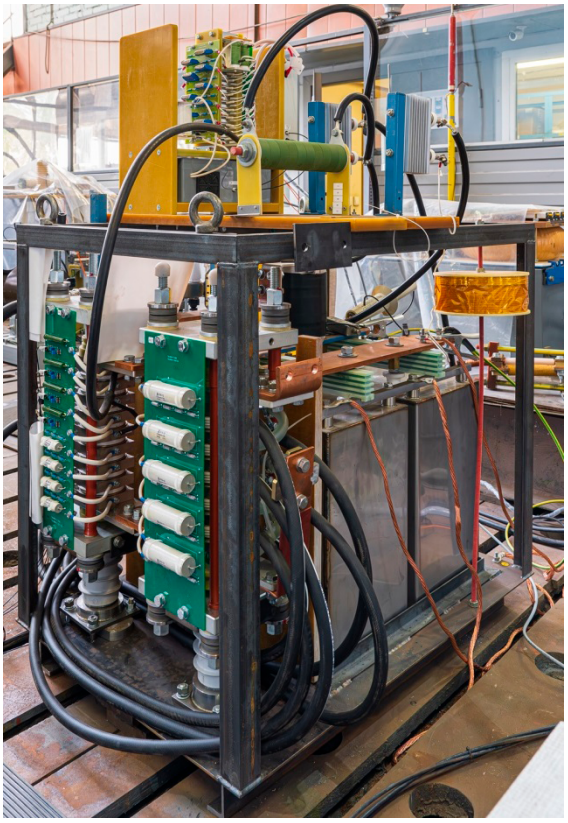


Рис. 10. Прототип конденсаторной ячейки

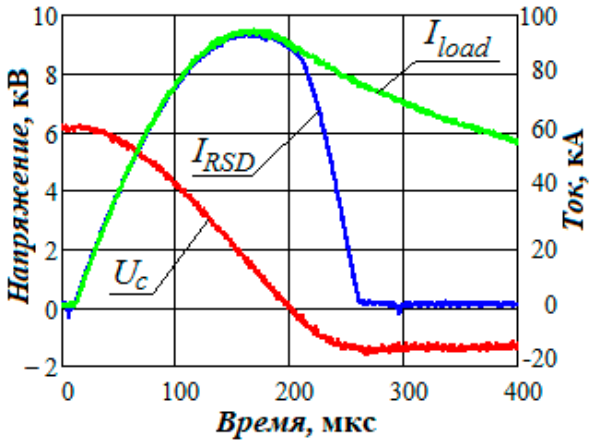


Рис. 11. Напряжение на конденсаторах U_c, ток в RSD I_{RSD} и полный ток I_{load} при разряде ячейки конденсатора. Полная индуктивность разрядной цепи 44,45 мкГн

циллограммы разряда конденсаторной ячейки представлены на рис. 11. Прототип испытан с частотой повторения импульсов 0,16 Гц.

Заключение

Разработана конденсаторная ячейка 36 кДж, 6 кВ, предназначенная для работы с частотой повторения импульсов 1 Гц. Блок коммутаторов этой ячейки состоит из реверсивно-включаемых динисторов, а также блокирующих и кроубарных диодов. Прототип конденсаторной ячейки собран и проходит испытания.

Библиографический список

1. *Фридман Б. Э., Рутберг Ф. Г.* Проводники и контакты в электрических цепях мегаамперных токов // Приборы и техника эксперимента. 2001. № 2. С. 70–78.

2. Development and Research of Heavy Pulse Current LTT Switch / B. Fridman [et al.] // IEEE Transaction on Plasma Science. 2016. Vol. 44. No. 7. P. 1195–1201.

3. Емкостной накопитель энергии 1 МДж / Б. Э. Фридман [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 5. С. 101–105.

4. Investigation of Reverse Switch-on Dynistors Upgrated for Reducing thr Endergy Loss When Switching Reverse-Current Pulses / S. V. Korotkov [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. 2018. Vol. 61. No. 3. P. 359–363.

5. Diagnostics of Capacitive Energy Stores / A. B. Gromov [et al.] // Proceedings of First International Conference on Defense Technology. ICDT-2018 (Beijng).

УДК 621.313.1 **DOI: 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-364-368**

Л. И. Чубраева*
доктор технических наук, член-корреспондент РАН
**Институт электрофизики и электроэнергетики РАН*

КОГЕНЕРАЦИОННАЯ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ

Рассмотрены вопросы создания когенерационной установки, составными частями которой являются ветротурбина, синхронный многодисковый генератор с возбуждением от постоянных магнитов мощностью 1 МВт и фреоновой системой охлаждения, система утилизации тепловых потерь этого генератора с помощью теплонасосной установки и система контроля и управления ветронергетической и теплонасосной установок. Показаны возможности снижения массогабаритных характеристик и повышения надежности и эффективности использования ветроэнергетического комплекса.
Ключевые слова: *когенерационная ветроэлектростанция, дисковый ветрогенератор, постоянные магниты, фреон, тепловой насос, ветроэнергетический комплекс, жидкий фреон.*

L. I. Chubraeva*
Dr. Sc., Tech., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences
**Institute of Electrophysics and Electric Power Engineering of RAS*

COGENERATION WIND-POWER PLANT

There are being discussed the problems, associated with the development of cogeneration plant, producing electrical and thermal energy, with the following components being included: wind turbine, synchronous multi-disc alternator with permanent magnets excitation rated 1 MW and freon cooling, system of alternator heat loss utilization by a heat-pump and system of regulation and control of both wind-power plant and heat-pump. The possibilities of size and weight parameters of the complex decrease and its reliability and efficiency increase are being discussed.
Keywords: *cogeneration wind farm, disk wind generator, permanent magnets, freon R113, heat pump, wind power complex, liquid freon.*

Когенерация представляет собой процесс совместной выработки электрической и тепловой энергии. Когенерационные установки широко применяется в малой энергетике (например, мини-ТЭЦ), обеспечивая следующие преимущества: тепло используется непосредственно в месте получения, что обходится достаточно дешево, потребитель приобретает энергетическую независимость. Когенерационная установка – это решение, позволяющее использовать тепло от работы ветрогенератора, которое иначе просто выбрасывается в воздух.

Когенерация позволяет отказаться от экономически неэффективных затрат на средства передачи энергии и исключает потери при транспортировке энергии, поскольку энергогенерирующее оборудование расположено в непосредственной близости от потребителя. Распределенная когенерационная энергетика может уменьшить капитальные вложения и снизить, как отмечено выше, стоимость производимой энергии. Несомненны и экологические преимущества когенерационных установок, поскольку при их эксплуатации существенно снижается выброс вредных веществ в атмосферу.

Сопоставление затрат на приобретение электрической и тепловой энергии и на собственное их производство приведено на рис. 1 [1].

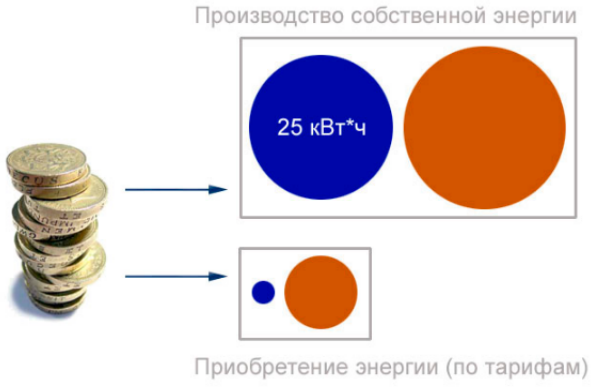


Рис. 1. Экономический эффект от производства электрической и тепловой энергии на электростанциях небольшой мощности

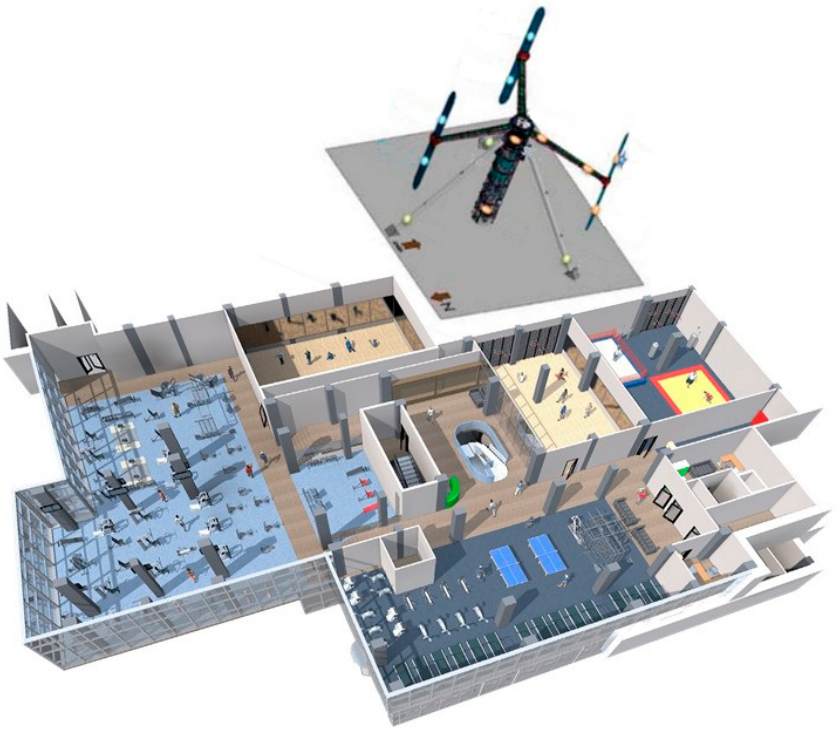


Рис. 2. Общий вид современного спортивного комплекса

Разрабатываемый когенерационный ветроэнергетический комплекс предназначен для обеспечения электроэнергией и горячего водоснабжения современного спортивного комплекса (рис. 2) [2].

Составными частями предлагаемой когенерационной установки являются ветротурбина, синронный многодисковый генератор с возбуждением от постоянных магнитов мощностью 1 МВт (рис. 3), система утилизации тепловых потерь этого генератора с помощью теплонасосной установки (рис. 4) и система контроля и управления ветронергетической и теплонасосной установок. Следует отметить, что, в отли-

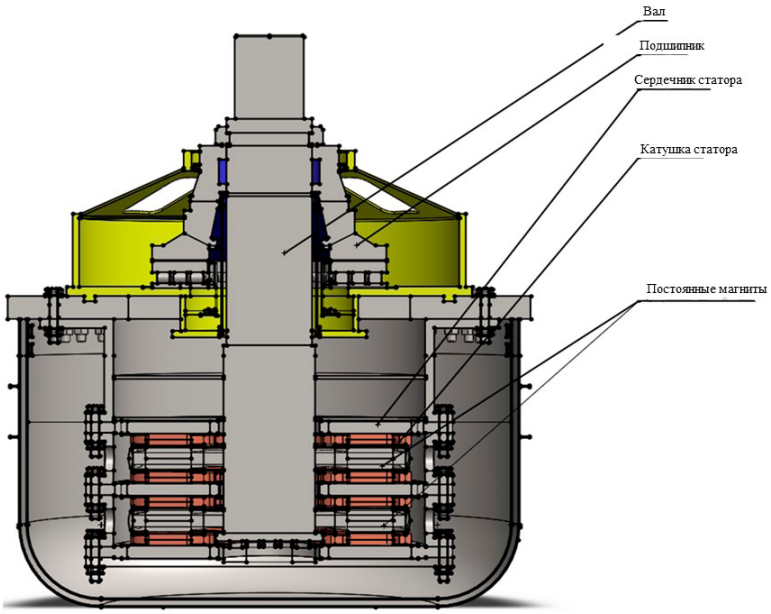


Рис. 3. Общий вид синхронного генератора для ветроэнергетической установки мощностью 1 МВт

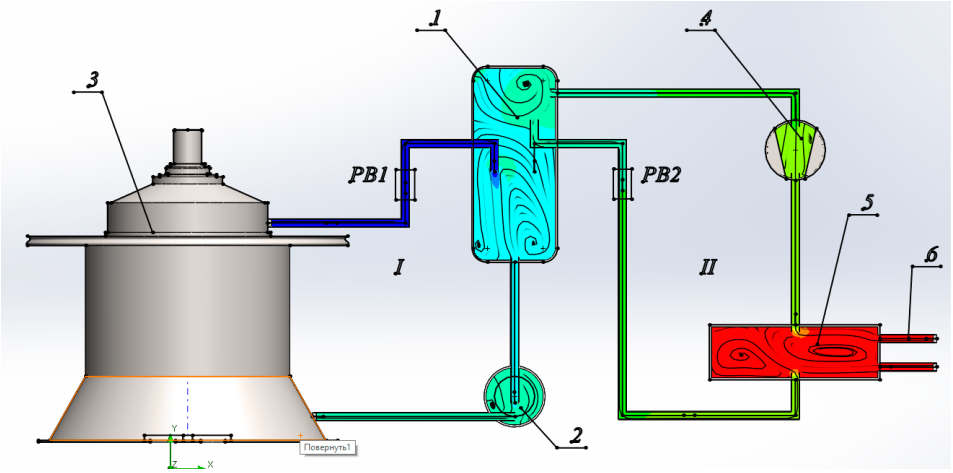


Рис. 4. Принципиальная схема системы охлаждения генератора с теплонасосным контуром

Таблица 1

Сопоставление характеристик фреона R113 и трансформаторного масла

Параметр	Фреон R113	Трансформаторное масло
Плотность, кг/м3	1576 при 20°C	895 при 20°C
Температура кипения, °C	47,6	–
Теплопроводность, Вт/(м·°C)	0,07	0,12
Кинематическая вязкость, 10–6, м2/с	0,43	9
Пробивное напряжение при 50 Гц и 25°C, кВ	31	70
tg δ при 100 Гц и 25°C	0,0001	0,005
ρ при 25°C, Ом·м	1014	1010–1011 при 90°C

чие от асинхронного генератора, синхронный генератор может работать как параллельно с сетью, так и в автономном режиме, что является безусловным преимуществом. Генератор имеет аксиальную магнитную систему, в которой неподвижный якорь с медными катушками расположен по обеим сторонам вращающегося дискового ротора [3].

Для охлаждения генератора используется жидкий фреон R113, представляющий собой электроизоляционную жидкость с хорошими теплофизическими характеристиками (табл. 1) [4]. Фреоны (хладоны) – это фторсодержащие насыщенные углеводороды. Для хладонов характерна хорошая совместимость с большинством материалов, применяемых в электротехнических изделиях. Кроме того, они отличаются уникальными теплофизическими характеристиками и способны обеспечивать гораздо более эффективный отвод тепла от охлаждаемых элементов, чем трансформаторные масла и кремнийорганические жидкости. Другими важными преимуществами фреонов являются их полная негорючесть и высокая дугостойкость.

Использование фреона для охлаждения генератора позволило снизить толщину электрической изоляции обмотки статора и уменьшить расстояния между активными и конструктивными элементами. В результате улучшены весовые и массогабаритные показатели этой электрической машины. Кроме того, хладагентом отводятся следующие потери: омические и добавочные потери в обмотке статора, потери в ферромагнитных сердечниках статора, потери в постоянных магнитах ротора, потери в конструктивных элементах генератора. Незначительное увеличение потерь на трение дисков ротора при вращении в среде фреона компенсируется их полезным использованием в теплонасосной установке. Тепловой насос является, как указывалось ранее, составляющей контура охлаждения генератора.

В осуществляемой системе охлаждения тепловые потери генератора отводятся к жидкому хладагенту R113. Нагретая жидкость дросселируется в регулирующем вентиле PB1 и поступает в сосуд 1, где происходит разделение жидкости и образовавшегося при дросселировании пара. Паровая фаза отводится к компрессору 4 и после сжатия конденсируется в конденсаторе 5 с отдачей теплоты на более высоком температурном уровне. Сжиженный хладагент дросселируется в вентиле PB2 и поступает в разделительный сосуд 1. В конденсаторе 5 теплота

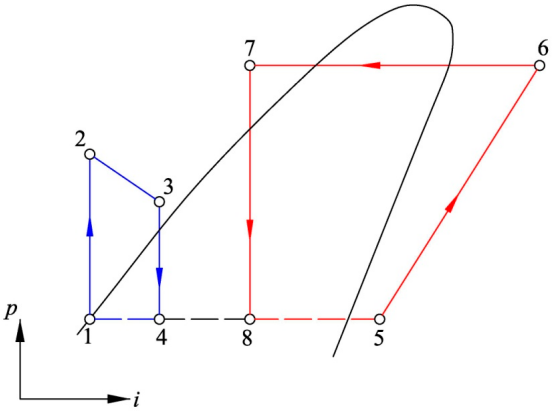


Рис. 5. Циклы охлаждения статора и теплового насоса: 1 – 2 – 3 – 4 – цикл R113 в системе охлаждения генератора; 5 – 6 – 7 – 8 – цикл R113 в системе теплового насоса

передается воде, нагретая вода поступает к потребителю.

Таким образом осуществляются циклы охлаждения генератора I и теплового насоса II, представленные на *ip*-диаграмме (рис. 5).

Жидкий фреон из разделительного сосуда 1 подается к статору специальным фреоновым насосом. Давление жидкости в корпусе генератора поднимается по сравнению с уровнем давления в сосуде 1 на величину, необходимую для отвода теплоты от генератора нагреванием жидкого хладона без его испарения внутри генератора. Система уплотнений генератора рассчитана на давление до 2 атм.

Теплонасосная установка состоит из собственно теплового насоса и системы, обеспечивающей подвод и отвод из источника низкопотенциальной теплоты, подачу нагретой в тепловом насосе среды потребителю и ее возврат к тепловому насосу.

Тепловой насос сам по себе не вырабатывает тепло, а лишь трансформирует тепловую энергию с низкого температурного уровня на более высокий, необходимый потребителю. Конечно, при этом он затрачивает электроэнергию, однако весьма экономно по сравнению, например, с непосредственным ее использованием для отопления жилищ. Коэффициенты полезного действия тепловых насосов чрезвычайно высоки, отношение полезной тепловой энергии к затраченной электроэнергии (коэффициент преобразования теплового насоса) иногда достигает 3 и более. Экономия электроэнергии при этом доходит до 75% и выше. Применение теплонасосных установок весьма перспективно в комбинированных системах в сочетании с другими технологиями использования возобновляемых источников энергии (солнечной, ветровой, биоэнергии), так как позволяет оптимизировать параметры сопрягаемых систем и достигать наиболее высоких экономических показателей [5, 6].

Указанные преимущества применения тепловых насосов обусловили их широкое и все возрастающее применение в развитых странах и во всем мире. Ставится задача не локального или ограниченного применения теплонасосного теплоснабжения, а максимального отказа от прямого сжигания для этих целей органического топлива.

При разработке когенерационной установки использован опыт создания и эксплуатации в условиях экспериментального стенда первого сверхпроводникового турбогенератора 20 МВА (рис. 6) [4].

В начале генератор был оснащен принудительной системой охлаждения статора фреоном R113. После первых испытаний было принято

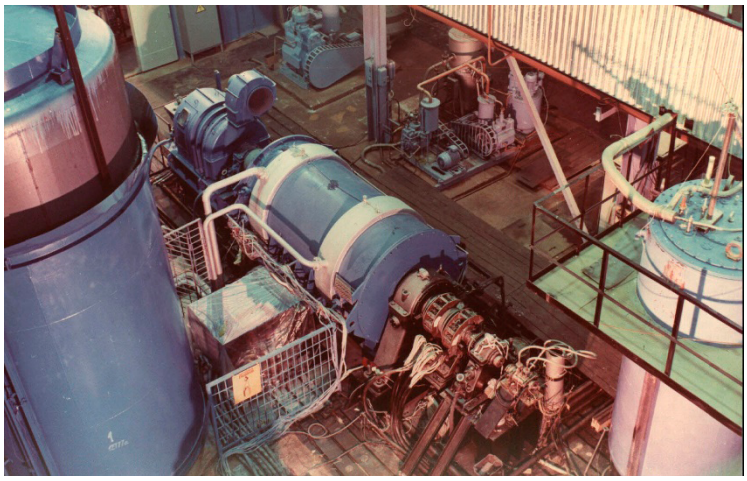


Рис. 6. Сверхпроводниковый генератор мощностью 20 МВА с фреоновой системой охлаждения статора

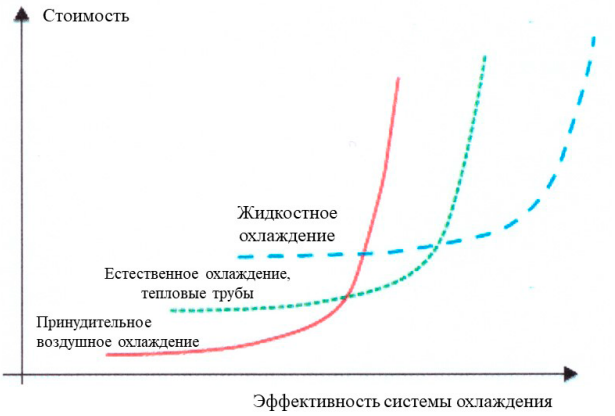


Рис. 7. Соотношение стоимости и эффективности различных систем охлаждения полупроводниковых преобразователей [7]

решение дооборудовать систему охлаждения теплонасосной установкой. В результате потери, выделявшиеся в активных и конструктивных элементах статора турбогенератора, стали использоваться для горячего теплоснабжения экспериментального стенда. Эффект от применения теплонасосной установки для этого генератора был связан с экономией условного топлива, которая была эквивалентна повышению и без того высокого КПД сверхпроводникового генератора на 0,34%, приближая КПД генератора к 100%. Ревизия статора генератора, проведенная через 8 лет эксплуатации, не выявила никаких изменений в примененных электроизоляционных и конструкционных материалах.

В случае когенерационной ветроэнергетической установки экономия условного топлива составляет 49 т топлива в год, что эквивалентно повышению КПД генератора на 2,5%. При этом уровень потерь, равный 90 кВт, достаточен, с учетом КПД теплового насоса, для подогрева воды в бассейне. Основным достоинством такой системы можно считать снижение затрат на эксплуатацию спортивного комплекса.

Эффективность теплового насоса может быть повышена включением в контур охлаждаемых устройств полупроводникового статического преобразователя. Повышение эффективности и снижение габаритов, а также улучшение показателей надежности этих устройств связано, в частности, с улучшением их охлаждения. Создание независимой системы жидкостного охлаждения полупроводниковых преобразователей ветроэнергетических установок обойдется дорого (рис. 7), а вот включение в контур теплонасосной установки для генератора позволит существенно снизить эти затраты.

Выводы

1. Предложена оригинальная система охлаждения синхронного генератора в составе ветроэнергетической установки, позволяющая улучшить его весовые, массогабаритные и эксплуатационные характеристики.

2. Сочетание ветроэнергетической и теплонасосной установок превращает комплекс в когенерационную систему, повышая эффективность использования ветроэнергетики.

3. Объединение системы охлаждения генератора с системой охлаждения статического преобразователя повышает эффективность когенерационной установки и надежность ее работы.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Библиографический список

1. *Ольховский Г. Г.* Совершенствование технологий комбинированной выработки электроэнергии и тепла на ТЭЦ России // Новости теплоснабжения. 2003. № 10.3.

2. *Chubraeva L. I., Timofeyev S. S.* Development of Cogeneration Wind-Power Plant with Freon-Cooled Synchronous Alternator // Материалы международной научно-технической конференция «SMART Автоматика и Энергетика» (SMART-SYSTEMS), 29–30 апреля 2024 г.

3. *Chubraeva L. I., Timofeyev S. S.* Wind Power Axial Flux Alternator Operating with a Heat Pump. 10-th European conference on renewable energy systems ECRES 2022 7–09 May 2022 Istanbul // Turkey Proceedings, Ed. by Prof. E. Kurt. 2023.

4. *Чубраева Л. И.* Генераторы нетрадиционного исполнения. Л., Наука, 1991. 246 с.

5. *Быков А. В., Калнинь И. М., Краузе А. С.* Холодильные машины и тепловые насосы. М.: Агропромиздат, 1988. 288 с.

6. *Калнинь И. М., Савицкий И. К.* Тепловые насосы: вчера, сегодня, завтра // Холодильная техника. 2000. Том 89, № 10. С. 2–6.

7. *Колпаков А.* Энергия, принесенная ветром // Силовая электроника. 2005. № 3.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Амплеева Анна Владимировна
Студент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – автоматизация, нелинейные системы управления, оптимизация.
a.ampleyeva@gmail.com

Антонов Михаил Александрович
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – автоматизация, SCADA-системы, автоматические системы управления технологическими процессами.
missa11133@mail.ru

Афанасьева Александра Валентиновна
Старший преподаватель кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – распределенные протоколы, стеганография, кодовые методы.
alra@k36.org
SPIN-код: 6826-1553

Бадика Егор Максимович
Студент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – робототехника, автоматизация, цифровые двойники, теория автоматического управления.
embadika@gmail.com

Безгодов Алексей Арнольдович
Кандидат военных наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – разработка и эксплуатация беспилотных транспортных систем и мобильных робототехнических комплексов, информационная безопасность.
ab.pm.1812@gmail.com

Беззатеев Сергей Валентинович
Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, криптография.
bsv@aanet.ru
SPIN-код: 9199-0258

Беззатеева Вероника Сергеевна
Старший преподаватель кафедры гражданского права.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Область научных интересов – защита несовершеннолетних в сети Интернет.
Bezzateeva@inbox.ru
SPIN-код 2528-5430

Бекназарова Саида Сафибуллаевна
Доктор технических наук, профессор.
Ташкентский университет информационных технологий им. М. Хоразмий.
Область научных интересов – компьютерные науки.
saida.beknazarova@gmail.com

Белай Василий Евгеньевич
Инженер.
ООО «НПФ «Полисервис»»
Область научных интересов – электроника, робототехника, алгоритмы и комплексы программ.
belvasevg@yandex.ru
SPIN-КОД: 2404-3976

Бобрышов Алексей Павлович
Аспирант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – робототехника, автоматизация, цифровые двойники, теория автоматического управления.
ap.bobryshov@mail.ru
SPIN-код: 2630-5787

Брунов Максим Сергеевич
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – нечеткие регуляторы, пространство состояний, дискретные системы.
mak-brunov@yandex.ru

Булатов Виталий Владимирович
Кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – методы контроля материалов и изделий, эксплуатационная надежность технических систем.
bulatov-vitaly@yandex.ru

Васильева Дина Владимировна
Старший преподаватель кафедры биотехнических систем и технологий.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – цифровая обработка сигналов.
dolli.dina@mail.ru
SPIN-код: 4166-7299

Ватаева Елизавета Юрьевна
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – синтез нелинейных систем автоматического управления, оптимизация систем управления.
elizavetavataeva@mail.ru
SPIN-код: 2234-6792

Головин Василий Юрьевич
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – имитационное моделирование, автоматизация, техническое зрение.
lichoyhohol@gmail.com

Голубков Виктор Александрович
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – контроль и диагностика электромеханических систем.
viktor-golubkov@yandex.ru

Гончаров Кирилл Сергеевич
Аспирант.
Воронежский государственный технический университет.
Область научных интересов – электротехнические комплексы и автоматизация промышленных установок.
goncharov12509@mail.ru

Гордиенко Андрей Юрьевич
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, интеллектуальные информационные системы, интернет вещей.
gordanandrey@yandex.ru

Горюнов Алексей Дмитриевич
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники..
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Инженер.
ООО «ТЭСО-Инжиниринг».
Область научных интересов – электроэнергетика, цифровая электроэнергетика, автоматизация, увеличение показателей надежности.
jloxazavr@mail.ru

Гречкин Никита Леонидович
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – синтез нелинейных систем автоматического управления, оптимизация систем управления, электрический привод, электрический машины.
space.suai@bk.ru
SPIN-код: 7170-8166

Григорьева Елизавета Дмитриевна
Магистрант кафедры информационных систем и технологий.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – оптимальное планирование и диспетчеризация информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов.
lizarapne@gmail.com
SPIN-код: 2802-1795

Давыдов Владислав Александрович
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – имитационное моделирование, автоматизация, техническое зрение.
vlad.davydov.dw@gmail.com

Данилова Валерия Викторовна
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, квантовая криптография, постквантовая криптография, киберфизические системы.
danilovavaleria581@gmail.com

Дворников Сергей Викторович
Доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – цифровая обработка сигналов.
practicdsv@yandex.ru
SPIN-код: 7109-9590

Елина Татьяна Николаевна
Кандидат экономических наук, доцент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, облачные технологии, математическое моделирование, нейронные сети, экспертные системы, системы поддержки и принятия решений, оценка экономической эффективности.
elinatn@yandex.ru
SPIN-код: 1442-6767

Еникеев Рустам Шамильевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Заместитель генерального директора по термоядерным и магнитным технологиям – директор НТЦ «СИНТЕЗ»,
АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры имени Д.В. Ефремова».
Область научных интересов – электрофизическая аппаратура, техника больших импульсных токов.
RSEnikeev@rosatom.ru

Жемелев Георгий Алексеевич
Аспирант, Высшая школа программной инженерии.
Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого.
Область научных интересов – программная инженерия, интеллектуальные информационные системы.
wws.dev@gmail.com

Зайниев Азат Венерович
Аспирант кафедры электротехники и электрооборудования предприятий.
Уфимский государственный нефтяной технический университет.
Область научных интересов – оценка технического состояния и диагностика автономных электротехнических комплексов.
Azat70000@gmail.com

Замурагин Юрий Михайлович
Научный сотрудник.
Институт Машиноведения им. А. А. Благонравова РАН.
Область научных интересов – механика машин, управление машинами, колебания механических систем, нелинейная динамика.
zamuragin@yandex.ru
SPIN-код: 9496-2831

Зенин Алексей Владимирович
Аспирант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Инженер лаборатории робототехники, инженер-электроник.
ООО «Научно-исследовательский экспертный центр инновационных технологий «ИНТЕХЭКСПЕРТИЗА».
Область научных интересов – робототехника, цифровая электроника, электроприводы и электродвигатели.
zenin2027@gmail.com
SPIN-код: 3299-1504

Зырянов Дмитрий Александрович
Студент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – робототехника, автоматизация, цифровые двойники, теория автоматического управления.
zyrikdima@gmail.com

Иванов Виктор Олегович
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – робототехника, электроэнергетика.
ivanovvictor207301@mail.ru

Исаков Константин Сергеевич
Аспирант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Главный инженер.
ООО «Селена».
Область научных интересов – 3D-печать, ЧПУ обработка, мехатроника, робототехнические системы.
isakov-k-s99@mail.ru
SPIN-код: 8167-7629

Колесова Анастасия Дмитриевна
Аспирант, ассистент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Инженер-конструктор.
АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова».
Область научных интересов – термоядерная энергетика, токамаки, сверхпроводниковые магнитные системы.
kolesovaad00@gmail.com

Колодязный Ян Игоревич
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – информационная безопасность, интеллектуальные информационные системы, квантовые вычисления.
kolodyazny@gmail.com

Коломойцев Владимир Сергеевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – построение информационных систем в защищенном исполнении, нормативно-правовая защита информации, оценка эффективности систем защиты информации, построение киберфизических систем.
Dekoros@guap.ru

Коробкин Кирилл Максимович
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – защита информации, информационная безопасность, проектирование и реализация систем защиты информации.
kiruhakor13@gmail.com

Криволапчук Игорь Григорьевич
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – авиационные тренажеры, системы управления.
ing@aanet.ru

Крюков Юрий Леонидович
Ведущий инженер.
АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова».
Область научных интересов – мощная электрофизическая аппаратура.
kryukov@sintez.niiefa.spb.su

Кудряшов Александр Евгеньевич
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – защита информации, информационная безопасность, проектирование и реализация систем защиты информации, обеспечение систем защиты информации нормативно-правовой документацией.
kudruashover@gmail.com

Кузьменко Владимир Павлович
Кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроснабжение, энергетические системы, освещение, качество электрической энергии, цифровые технологии, системы цифровой релейной защиты, цифровые двойники в электроэнергетике.
mr.konnny@gmail.com
SPIN-код: 3159-4202

Кузьменко Юрий Павлович
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроэнергетика, светодиодное освещение, системы управления освещением.
spider56boy@gmail.com

Курбанов Вугар Гариб оглы
Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры управление в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Старший научный сотрудник.
Институт проблем машиноведения РАН.
Область научных интересов – оптимизация систем, принятие решение, управление техническими системами, распознавание образов.
vugar_borchali@yahoo.com
SPIN-код: 8589-0070

Кучмин Андрей Юрьевич
Доктор технических наук.
И. о. заведующего лаборатории интеллектуальных электромеханических систем, ведущий научный сотрудник.
Институт проблем машиноведения РАН.
Область научных интересов – интеллектуальные электромеханические системы, интеллектуальное управление, идентификация систем.
radiotelescope@yandex.ru, kayu@ipme.ru
SPIN-код: 6671-3874

Лач Сергей Юрьевич
Ассистент кафедры электромеханики и робототехники, заведующий лабораторией СКБ «Силовые машины – ГУАП».
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроэнергетика и электротехника, робототехника и мехатроника.
Serzh.lach@mail.ru

Левченко Денис Григорьевич
Аспирант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – робототехника, искусственный интеллект.
denis6499@yandex.ru

Леевик Антон Георгиевич
Аспирант.
Университет ИТМО.
Область научных интересов – постквантовая криптография, протоколы конфиденциальных вычислений.
anton.leevik@gmail.com

Литвиненко Александр Михайлович
Доктор технических наук, профессор кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах.
Воронежский государственный технический университет.
Область научных интересов – электротехнические комплексы и автоматизация промышленных установок.
litvinenko@eauts.vorstu.ru
SPIN-код: 9530-1250

Лян Илья Павлович
Кандидат технических наук, научный сотрудник.
Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН.
Область научных интересов – нелинейные колебания, автоматическое управление вибрационными машинами.
LyanIlyaIMASH@yandex.ru
SPIN-код: 2369-5534

Малкова Виктория Валерьевна
Лаборант кафедры машиноведения и инженерной графики.
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева.
Область научных интересов – проектирование и параметрический синтез робототехнических систем.
victoria.malkova_08@mail.ru
SPIN-код: 1133-3798

Марковский Евгений Станиславович
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный. университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, методы аутентификации, оценка эффективности систем защиты информации, транспортные протоколы.
mes-2010@ya.ru
SPIN-код: 6379-2581

Мартынов Александр Александрович
Кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Область научных интересов – электромеханика, электрические машины и полупроводниковая преобразовательная техника.
martynov41@mail.ru
SPIN-код: 9697-2409

Мастеров Андрей Петрович
Ассистент кафедры электромеханики и робототехники, инженер лаборатории робототехники Инженерной школы.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – мобильные роботы, интернет вещей, робототехнические системы.
elmaster55387@gmail.com
SPIN-код: 8741-0524

Медведев Максим Валерьевич
Инженер-программист.
АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова».
Область научных интересов – системы управления мощной электрофизической аппаратурой.
medvedev@sintez.niiefa.spb.su

Медунецкий Виктор Михайлович
Доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – роботизированные технологические линии и дополнительное специализированное оборудование для роботов.
vm57med@yandex.ru
SPIN-код: 6632-0686

Мельников Сергей Юрьевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электротехника, электроника, шаговые электродвигатели.
sburime@mail.ru

Морозов Александр Борисович
Аспирант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – робототехника.
alex.moroz415@gmail.com
SPIN-код: 6297-8220

Мошкунов Сергей Игоревич
Доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заведующий отделением импульсной техники и электрофизики.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Область научных интересов – импульсная техника, электроэнергетика, сильноточная электроника.
serg-moshkunov@yandex.ru
SPIN-код: 4103-8401

Мускатиньев Вячеслав Геннадиевич
Заместитель директора – главный конструктор.
АО «ЭЛПРЕСС».
Область научных интересов – силовые полупроводниковые приборы и изделия на их основе.
el.press@mail.ru

Мыльников Владимир Аркадьевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, облачный технологии, распределенные системы, математическое моделирование.
va.mylnikov@yandex.ru
SPIN-код: 1211-5328

Насибов Арсен Эльзарович
Аспирант.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, информационные системы.
arsennasibov@yandex.ru
SPIN-код: 2679-5921

Немаев Дмитрий Юрьевич
Инженер-конструктор.
АО «ЭЛПРЕСС».
Область научных интересов – проектирование изделий на основе силовых полупроводниковых приборов.
el.press@mail.ru

Нечаев Николай Евгеньевич
Инженер-исследователь.
АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова».
Область научных интересов – мощная электрофизическая аппаратура.
nechaevv@sintez.niiefa.spb.su

Никитина Катерина Сергеевна
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – энергоэффективность электроэнергетических систем, повышение энергетической эффективности, менеджмент в электроэнергетике.
katerina_2404@inbox.ru

Никифоров Максим Романович
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – исследование архитектур и алгоритмов машинного обучение, обработка естественного языка, построение генеративных моделей.
max-niki16@mail.ru

Панкратов Аркадий Геннадьевич
Студент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы автоматического управления, беспилотные летательные аппараты.
arkadipan@mail.ru
SPIN-код: 4434-3924

Поддуев Михаил Евгеньевич
Инженер-конструктор.
АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова».
Область научных интересов – мощная электрофизическая аппаратура.
podduev@sintez.niiefa.spb.su

Положенцев Дмитрий Сергеевич
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы управления, прецизионный электропривод.
pds6476564@yandex.ru

Полякова Татьяна Геннадьевна
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – интеллектуальные системы автоматического управления.
tg-p@mail.ru

Прокофьева Мария Константиновна
Аспирант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Начальник конструкторского отдела.
ООО «Рантэк-С».
Область научных интересов – роботы, мехатроника, робототехнические системы.
prokofevamk@yandex.ru

Прохоров Глеб Александрович
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность.
pr.gleb@bk.ru

Расова София Станиславовна
Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории цифровизации, анализа и синтеза сложных механических систем, сетей и сред.
Институт проблем машиноведения РАН.
Область научных интересов – оптимизация, математическое моделирование.
s.rasova@gmail.com, rss@ipme.ru
SPIN-код: 5942-7195

Решетникова Наталия Викторовна
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы автоматического управления, нестационарные системы, авиационные тренажеры.
rnv31kaf@mail.ru
SPIN-код: 9704-0264

Романова Марина Сергеевна
Старший преподаватель кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроснабжение, автоматизация процессов, жизненный цикл продукции.
marina.2108@mail.ru
SPIN-код: 8961-0380

Рудаков Роман Вадимович
Аспирант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Инженер-конструктор.
«Алитер-Акси».
Область научных интересов – мехатроника и робототехника, управляемые адаптивные системы, адаптивность робототехнических систем.
rorud007@mail.ru

Рулев Андрей Михайлович
Ассистент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Инженер.
АО «Научно-исследовательский институт командных приборов».
Область научных интересов – теория автоматического управления, нелинейные системы, электропривод.
andreyrul84@gmail.com
SPIN-код: 2630-5787

Рындюк Виктория Александровна
Кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, киберфизические системы.
vika012001@mail.ru

Салова Ирина Александровна
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование методом конечных элементов.
salova_irine@mail.ru

Семенов Александр Романович
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – машиностроение, автоматизация и модернизация производства, анализ и структурирование информации, робототехника, мехатроника, алгоритмика.
pekmen20@yandex.ru

Семенова Вероника Алексеевна
Кандидат экономических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – управление эффективностью деятельности и качеством продукции промышленных предприятий.
9767871@mail.ru
SPIN-код: 8284-7075

Семенова Наталья Геннадьевна
Доктор педагогических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры автоматизированного электропривода, электромеханики и электротехники.
Оренбургский государственный университет.
Область научных интересов – интеллектуальная электроэнергетика.
ng_sem@mail.ru
SPIN-код: 3072-2630

Серебров Роман Александрович
Начальник лаборатории, кандидат технических наук.
АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова».
Область научных интересов – мощная электрофизическая аппаратура.
serebrov@sintez.niiefa.spb.su

Сержантова Майя Вячеславовна
Кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – автоматизация и управление технологическими производствами.
xyz43210@mail.ru
SPIN-код: 1109-2272

Солёная Оксана Ярославовна
Кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – энергосбережение и повышение энергетической эффективности, развитие методов оценки безопасности технологических объектов.
osolenaya@guap.ru
SPIN-код: 4270-3622

Солёный Сергей Валентинович
Кандидат технических наук, проректор по образовательным технологиям и инновационной деятельности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроэнергетика, электромеханика, автоматизация, робототехника, информационная безопасность, технологическое предпринимательство, искусственный интеллект.
ssv555ssv@yandex.ru
SPIN-код: 3957-5891

Софронов Александр Андреевич
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Инженер-конструктор.
ООО «РЭО».
Область научных интересов – электромеханика, силовая преобразовательная техника, электроника.
sofronovalexx21@gmail.com

Статкевич Анастасия Вячеславовна
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы автоматического управления, нестационарные системы, системы с переменной структурой.
astat19@yandex.ru
SPIN-код: 7825-7540

Суслин Никита Константинович
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Инженер-программист.
НПЦ «СЭС».
Область научных интересов – микропроцессорные системы, ПЛИС, программирование.
superzoos@mail.ru

Татжиков Данил Алексеевич
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – защита информации, информационная безопасность, проектирование и реализация систем защиты информации, обеспечение систем защиты информации нормативно-правовой документацией.
tatdanil03@gmail.com

Тихомиров Иван Максимович
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Инженер 3 категории.
НПЦ «СЭС».
Область научных интересов – электрический привод, силовая электроника.
pavychok1@mail.ru

Ушаков Виталий Анатольевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – разработка научных основ комплексной автоматизации решения задач проактивного объемно-календарного планирования и оперативного управления материальными и информационными процессами в сложных объектах в различных условиях изменения внешней обстановки.
ushakov@guap.ru
SPIN-код: 2461-6577

Федоренко Андрей Григорьевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – проблемы повышения точности многополюсных вращающихся трансформаторов.
12051312@mail.ru
SPIN-код: 2234-6792

Федоров Сергей Денисович
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование и симуляция, компьютерное зрение и распознавание объектов, машинное обучение, реальное время и высокопроизводительные вычисления.
serzh-fedorov2004@mail.ru

Фомичева Светлана Григорьевна
Кандидат технических наук, профессор кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, интеллектуальные информационные системы, квантовые вычисления.
levikha@rambler.ru

Фридман Борис Эммануилович
Доктор технических наук, профессор.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Главный научный сотрудник.
АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова».
Область научных интересов – мощная импульсная техника.
b.fridman@yahoo.com
SPIN-код: 1443-8016

Хабибуллина Лейсан Фаритовна
Ассистент кафедры машиноведение и инженерной графики.
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева.
Область научных интересов – проектирование и параметрический синтез робототехнических систем.
leisan_vafina19@mail.ru
SPIN-код: 1787-8100

Хабибуллин Фаниль Фаргатович
Кандидат технических наук, заведующий кафедрой машиноведения и инженерной графики.
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева.
SPIN-код: 1710-6050
Область научных интересов – проектирование и параметрический синтез робототехнических систем.
Fanil_arsk@mail.ru
SPIN-код: 1710-6050

Хакимьянов Марат Ильгизович
Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий.
Уфимский государственный нефтяной технический университет.
Область научных интересов – повышение энергоэффективности и оптимизация режимов работы электроприводов в нефтедобывающей промышленности.
hakimyanovmi@gmail.com
SPIN-код: 2423-3839

Хапугин Алексей Александрович
Инженер-конструктор.
АО «ЭЛПРЕСС».
Область научных интересов – силовые полупроводниковые приборы и изделия на их основе.
a.khapugin@elpress.ru

Хуцаева Алтана Феликсовна
Ассистент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – криптография, постквантовая криптография.
akhutsaeva@yandex.ru
SPIN-код: 9096-4328

Чернов Олег Андреевич
Студент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – синтез нелинейных систем автоматического управления, оптимизация систем управления, электрический привод, электрические машины.
ereexxnavi@yandex.ru

Чернышева Ольга Борисовна
Старший преподаватель кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроэнергетика, возобновляемые источники энергии, электрический привод.
olgchern@mail.ru
SPIN-код: 9712-8318

Чирков Глеб Вячеславович
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – защита информации, информационная безопасность, проектирование и реализация систем защиты информации, обеспечение систем защиты информации нормативно-правовой документацией.
gledan2003@yandex.ru

Чубраева Лидия Игоревна
Доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заведующая лабораторией электроэнергетики.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Главный научный сотрудник.
Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН.
Область научных интересов – фундаментальные и прикладные исследования в области общепромышленной и специальной электроэнергетики, электромеханики, систем накопления энергии, сверхпроводниковых преобразователей энергии, электромагнитных, электромеханических и теплофизических процессов в электротехнических системах, функциональных материалов для низкотемпературных преобразователей и накопителей энергии.
lidiach@mail.ru
SPIN-код: 5008-9622

Шейченко Денис Романович
Студент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – синтез нелинейных систем автоматического управления, оптимизация систем управления, электрический привод, электрические машины.

Шершунова Екатерина Александровна
Кандидат технических наук, заведующая лабораторией мощной импульсной техники.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Область научных интересов – импульсная техника, электрофизика, физика газового разряда.
eshershunova@ieeras.ru
SPIN-код: 1314-5887

Шишлаков Владислав Федорович
Доктор технических наук, профессор, директор Института киберфизических систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – синтез нелинейных систем автоматического управления с различными видами модуляции сигнала.
shishlakov@guap.ru
SPIN-код: 3398-3859

Шишлаков Дмитрий Владиславович
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – многосвязные системы автоматического управления.
Fleitahd@gmail.com

Шорохов Семен Константинович
Студент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование систем автоматического управления, электрический привод, электрические машины.
shorsem@ya.ru

Шохин Александр Евгеньевич
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник.
Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН.
Область научных интересов – вибрационные процессы, вибрационная техника, динамика нелинейных систем, управление машинами, виброзащита, математическое моделирование.
shohinsn@mail.ru
SPIN-код: 2525-1448

Якимовский Дмитрий Олегович
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Начальник научно-исследовательского отдела.
АО «Научно-исследовательский институт командных приборов», Санкт-Петербург.
Область научных интересов – электропривод, прецизионное приборостроение.
yakimovsky@yandex.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 3

Бекназарова С. С. АЛГОРИТМ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ОСНОВАННЫЙ НА МЕТОДАХ ПОИСКА И СОПОСТАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО ОБРАЗЦУ 3

Афанасьева А. В., Марковский Е. С., Никифоров М. Р., Федоров С. Д. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ В СЕТЕВОМ ТРАФИКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ БЕЗ УЧИТЕЛЯ 9

Бадика Е. М., Зырянов Д. А., Бобрышов А. П. ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО АССИСТЕНТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ КАЧЕСТВА РАЗМЕТКИ ДАННЫХ 15

Беззатеев С. В. КВАНТОВОЗАЩИЩЕННАЯ СИСТЕМА ВЗАИМНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТИ 22

Беззатеева В. С. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОВЕДЕНИЯ НЕСОВЕРШЕННОЛЕТНИХ В СЕТИ 25

Григорьева Е. Д., Ушаков В. А. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ СВОЕВРЕМЕННОЙ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНОТИПНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ 29

Дворников С. В., Васильева Д. В. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ 33

Елина Т. Н. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАЩИТЫ ИНТЕЛЛЕКТ-КАРТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ ПОДПИСИ 37

Елина Т. Н. ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ДОКУМЕНТООБОРОТА ПРИ ВЕДЕНИИ КЛИНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ 41

Коробкин К. М., Коломойцев В. С., Чирков Г. В. ПРИМЕНЕНИЕ МЕЛ-КЕПСТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ГОЛОСА В СИСТЕМАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ 44

Кудряшов А. Е., Татжиков Д. А., Коломойцев В. С. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ КИБЕРСИСТЕМ К АТАКАМ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА 49

Левченко Д. Г., Ганьшин Ю. А. АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ДАННЫХ 55

Мыльников В. А. МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ СООТВЕТСТВИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ НА ПРЕДПРИЯТИИ ТРЕБОВАНИЯМ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА 60

Мыльников В. А. ПОВЕДЕНЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДЕЙСТВИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ 65

Насибов А. Э. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ОПЕРАТИВНЫХ ЦЕНТРОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ 69

Прохоров Г. А., Афанасьева А. В. ФАЗЗИНГ-ТЕСТИРОВАНИЕ И СПОСОБЫ ЕГО УЛУЧШЕНИЯ 73

Рындюк В. А., Колодязный Я. И. ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ. СОВРЕМЕННЫЕ УГРОЗЫ И МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ 77

Рындюк В. А., Гордиенко А. Ю. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АТАК НА IOT-УСТРОЙСТВА 80

Ушаков В. А. УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ 84

Фомичева С. Г. УСИЛЕНИЕ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТИ ПРИ РАСПРЕДЕЛЕННОМ МАШИННОМ ОБУЧЕНИИ 87

КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Фомичева С. Г., Жемелев Г. А. СЕЛЕКТИВНОЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЕ ОБУЧЕНИЕ АВТОЭНКОДЕРОВ 91

Хуцаева А. Ф., Леевик А. Г., Беззатеев С. В. АНАЛИЗ ПОСТКВАНТОВЫХ ПРОТОКОЛОВ ЗАБЫВЧИВОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ 95

МЕХАТРОНИКА И ВИБРАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 102

Головин В. Ю., Давыдов В. А., Булатов В. В. ОБЗОР ПРОГРАММНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СИМУЛЯЦИИ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ ПОВЕДЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ 102

Гончаров К. С., Литвиненко А. М. СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО МОДУЛЯ РУЛЕВОГО ПРИВОДА ИНФОРМАЦИОННОГО РОБОТА 109

Лян И. П. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА ВИБРАЦИОННОЙ МАШИНЫ С СЫПУЧЕЙ СРЕДОЙ 114

Медунецкий В. М. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ 119

Семенов А. Р., Коломойцев В. С. К ВОПРОСУ НЕОБХОДИМОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТИЗАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРОЦЕССЕ 122

Шохин А. Е., Замурагин Ю. М. О КОЛЕБАНИЯХ ВИБРОПЛАТФОРМЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С МАТЕРИАЛОМ 126

Якимовский Д. О., Полякова Т. Г. СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ СИЛОВОГО ГИРОСКОПА 134

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ 141

Антонов М. А., Амплеева А. В., Сержантова М. В. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ SCADA-СИСТЕМ 141

Гречкин Н. Л., Ватаева Е. Ю., Шишлаков В. Ф. АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ТОЧЕК ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ЭЛЕМЕНТА «ЗОНА НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ» 146

Гречкин Н. Л., Ватаева Е. Ю., Шишлаков Д. В. ВЫЧИСЛЕНИЕ ТОЧЕК ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ЭЛЕМЕНТА «ЗОНА НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ» 150

Зырянов Д. А., Бадика Е. М., Бобрышов А. П. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ В ЗАДАЧАХ ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТА В СРАВНЕНИИ С ЭВРИСТИЧЕСКИМИ 153

Исаков К. С., Семенова В. А. МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛАСТИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ 158

Курбанов В. Г. МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАМЕНТА ВОДИТЕЛЯ 166

Кучмин А. Ю., Расова С. С. ПРОБЛЕМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ С ЛИНЕЙНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ В СЛУЧАЕ ПУСТОЙ ОБЛАСТИ ДОПУСТИМЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ СИНТЕЗЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ 170

Малкова В. В., Хабибуллин Ф. Ф., Хабибуллина Л. Ф. О МЕТОДАХ ОБРАЗОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ 175

Морозов А. Б., Безгодов А. А. СОВРЕМЕННАЯ СКЛАДСКАЯ ЛОГИСТИКА: ВНЕДРЕНИЕ RFID-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ 179

Мыльников В. А. СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЕЧНЯ ПРАВИЛ МЕЖСЕТЕВЫХ ЭКРАНОВ 185

Решетникова Н. В., Шорохов С. К. ВЛИЯНИЕ КОРНЕЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ И КАЧЕСТВО СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ 188

Рулев А. М., Брунов М. С., Криволапчук И. Г., Шишлаков В. Ф. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИРРАЦИОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ТИПОВЫХ СТАТИЧЕСКИХ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ 191

Рулев А. М., Якимовский Д. О. О РАЗРАБОТКЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИЛОВОГО ГИРОСКОПА С УЧЕТОМ СБОЕВ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ 198

Рындюк В. А., Данилова В. В. ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДАННЫХ В КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ 206

Статкевич А. В., Шишлаков В. Ф. СИНТЕЗ СТАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ 209

Фомичева С. Г. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ БЕЗОПАСНЫХ КОНВЕЙЕРОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 212

Шорохов С. К., Панкратов А. Г., Решетникова Н. В. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ 216

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА 220

Белай В. Е., Романова М. С., Чернышева О. Б., Мастеров А. П. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАТЧИКА ОСВЕЩЕННОСТИ TEMT6000 ПРИ РАБОТЕ С ФРЕЙМВОРКОМ ESPRESSIF 220

Бобрышов А. П., Лач С. Ю., Солёный С. В., Кузьменко В. П. АНАЛИЗ КАЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОЦЕНКИ ПОВЕРКИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ 224

Горюнов А. Д., Сержантова М. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕКЛОУЗЕРОВ ДЛЯ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 КВ 231

Гречкин Н. Л., Чернов О. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ТТ – MOTOR 236

Кучмин А. Ю. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ 239

Мартынов А. А. ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ТИРИСТОРНОГО УСТРОЙСТВА ПЛАВНОГО ПУСКА С ТОКООГРАНИЧЕНИЕМ 246

Мартынов А. А., Чернышева О. Б. К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ ПОПЛАВКОВЫХ ВОЛНОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО И ЛИНЕЙНОГО ТИПА 251

Положенцев Д. С. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ 257

Рудаков Р. В. АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НА КВАЗИСКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ 264

Салова И. А., Мельников С. Ю. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА 270

Семенова Н. Г. НАХОЖДЕНИЕ ОТКЛЮЧИВШЕГОСЯ ОБОРУДОВАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 277

Солёная О. Я., Никитина К. С. РАЗВИТИЕ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ В РОССИИ 282

Солёный С. В., Иванов В. О. ОСОБЕННОСТИ ДЕФЕКТОВ ИЗОЛЯТОРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 287

Чернышева О. Б. ОЦЕНКА ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИЛИВНЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ 293

Шейченко Д. Р., Гречкин Н. Л., Ватаева Е. Ю. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ДЛЯ ОБЪЕКТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ 297

ЭЛЕКТРОПРИВОД, ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ 300

Голубков В. А., Федоренко А. Г., Ватаева Е. Ю. УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ 300

Давыдов В. А., Головин В. Ю., Булатов В. В. МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА 304

Зайниев А. В., Хакимьянов М. И. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ГАЗОПОРШНЕВЫХ АГРЕГАТОВ С СИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ 310

Кузьменко Ю. П., Солёный С. В. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕННОСТЬЮ 315

Мартынов А. А. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ КОММУТАЦИИ ВЫПРЯМИТЕЛЯ НА ПЕРЕХОДНЫЕ И УСТАНОВИВШИЕСЯ РЕЖИМЫ ЕГО РАБОТЫ 320

Прокофьева М. К., Булатов В. В. КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ ОПТИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА 326

Сержантова М. В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРОЦЕССЕ 331

Софронов А. А., Мартынов А. А. ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ЗАДАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ НА ХАРАКТЕР ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПУСКА ТРАНСФОРМАТОРОВ 334

Суслин Н. К., Тихомиров И. М., Сержантова М. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОДА 340

Шершунова Е. А., Мошкунов С. И. ИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА 345

ЭЛЕКТРОФИЗИКА 349

Зенин А. В., Мартынов А. А. АНАЛИЗ СПОСОБОВ РЕАЛИЗАЦИИ ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ 349

Колесова А. Д. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОКАМАКОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ 352

Еникеев Р. Ш., Фридман Б. Э., Крюков Ю. Л., Медведев М. В., Мускатиньев В. Г., Немаев Д. Ю., Нечаев Н. Е., Поддуев М. Е., Серебров Р. А., Хапугин А. А. КОНДЕНСАТОРНАЯ ЯЧЕЙКА ДЛЯ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ С ВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ 357

Чубраева Л. И. КОГЕНЕРАЦИОННАЯ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ 364

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 369

Научное издание

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'25

XX Международная конференция по электромеханике и робототехнике 15–16 апреля 2025 г.

Сборник докладов

ISBN: 978-5-8088-2020-3

Ответственные за выпуск:
доктор технических наук, профессор В. Ф. Шишлаков;
М. С. Романова

Редакторская подготовка *Л. Ю. Кладовой*
Компьютерная верстка *А. Н. Колешко*

Подписано к печати 28.03.2025. Дата выхода в свет: 04.04.2025.
Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 41,7. Уч.-изд. л. 42,5. Тираж 150 экз. Заказ № 45.

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Распространяется бесплатно