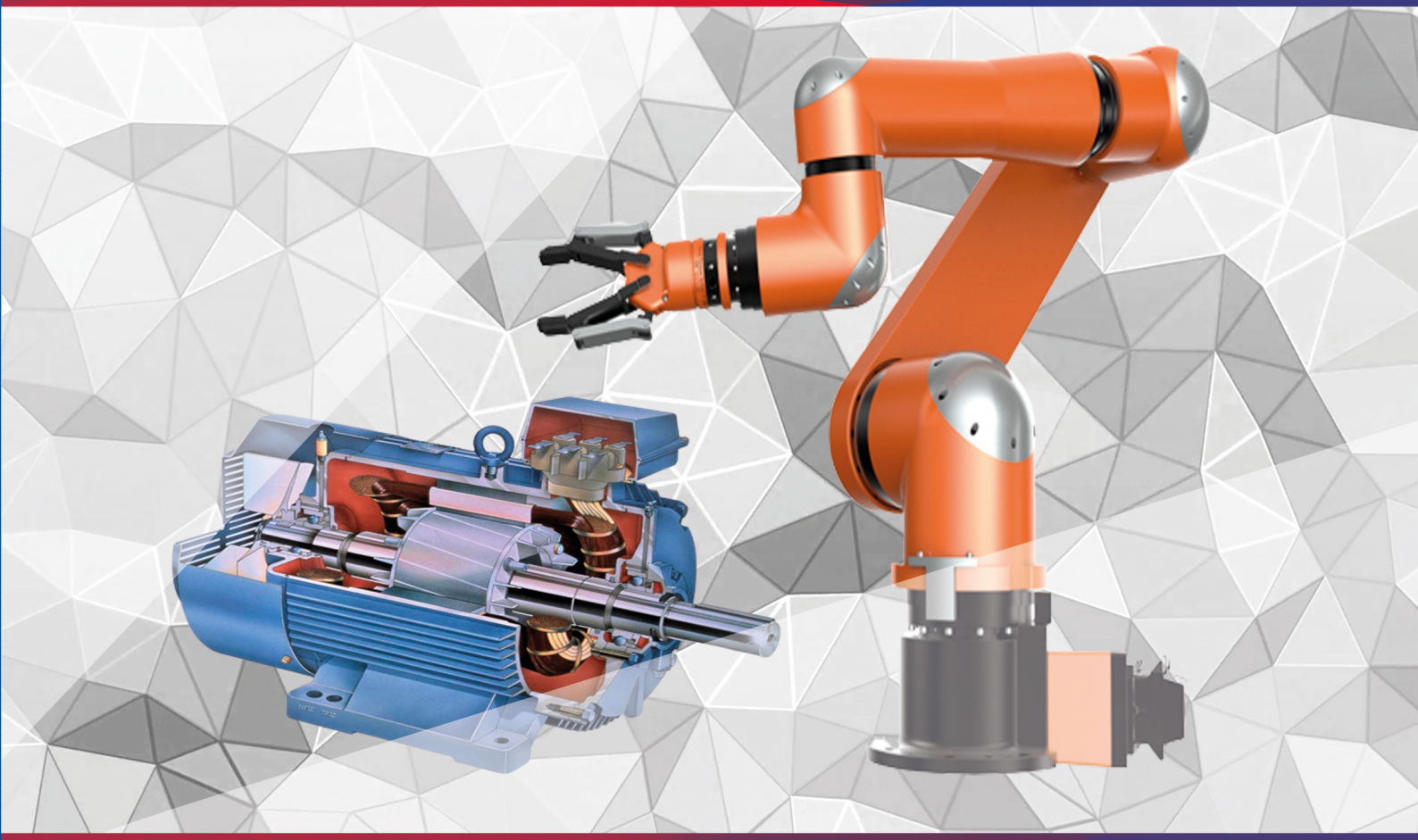
ГУАП

Государственный университет
аэрокосмического приборостроения



ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ’24

XIX Международная конференция по электромеханике и робототехнике 16–17 апреля 2024 г.

Санкт-Петербург

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

Посвящается
300-летию Российской академии наук

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ '24

XIX Международная конференция по электромеханике и робототехнике 16–17 апреля 2024 г.

Сборник докладов

Санкт-Петербург
2024

УДК 001
ББК 72
З-13

З-13 Завалишинские чтения'24: XIX Международная конференция по электромеханике и робототехнике (СПб., 16–17 апр. 2024 г.): сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2024. – 334 с.
ISBN 978-5-8088-1916-0
DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19

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 оргкомитета конференции

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

Председатель программного комитета

В. Ф. Шишлаков – доктор технических наук, профессор, проректор по образовательным технологиям и инновационной деятельности ГУАП, 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

С. В. Солёный – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники, директор Инженерной школы ГУАП

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 978-5-8088-1916-0
DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19

© Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.056.55 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-3-8**

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ПОСТРОЕНИЮ АНТИКОАЛИЦИОННЫХ КОДОВ

Рассмотрены известные подходы и результаты их применения к построению антикоалиционных кодов. Данные коды имеют большое значение для борьбы с нелегальным распространением цифровых объектов авторского права. В ходе исследования рассмотрены основные характеристики данных кодов – длины меток, размер отслеживаемой коалиции, сложность алгоритма декодирования. От области применения данных кодов зависит значимость характеристик данных кодов, следовательно, именно их оценка позволит корректно выбрать подход для решения конкретной задачи.
Ключевые слова: *стеганография, цифровые водяные знаки, коалиционные атаки, антикоалиционные коды.*

A. V. Afanasyeva*
Senior Lecturer
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

STUDY OF APPROACHES TO THE CONSTRUCTION OF FINGERPRINT CODES

This paper will discuss well-known approaches and the results of their application to the construction of fingerprint codes. These codes are of great importance for preventing the illegal distribution of digital copyright objects. The study examined the main characteristics of these codes – codeword lengths, the size of the tracked coalition, and the complexity of the decoding algorithm. Depending on the area of application of these codes, the significance of the characteristics of these codes depends, therefore, it is their assessment that will allow you to correctly select the approach to solve a specific problem.
Keywords: *steganography, digital watermarks, coalition attacks, fingerprint codes.*

Введение

В последние годы задача защиты авторских прав на коммерческие цифровые продукты решается при помощи цифровых водяных знаков. При этом различают особые типы знаков, направленные на доказательство владения объектом и предназначенные для отслеживания приобретателей копии объекта. При этом меняется модель атак на систему, если при одном владельце единственный способ удаления метки – это внесение искажений в цифровой объект-носитель, то при отслеживании копий возникает дополнительная возможность анализа меток, путем сравнения копий разных владельцев. Для защиты от таких направленных атак в качестве специальных меток используются слова антикоалиционных кодов. Особенно актуальна задача отслеживания пользователей, нелегально распространяющих приобретенный контент в современных системах платного цифрового вещания и видео по запросу (VoS).

Коалиционные атаки

Коалиционная атака – создание нелицензионной копии продукта с индивидуальной меткой коалицией злоумышленников на основе сравнения своих копий продукта по одной из выбранных стратегий атаки.

Начиная с работы [1], при анализе антикоалиционных кодов принимается следующее предположение, которое во всех работах именуется как «основное допущение маркирования»: коалиция пиратов может обнаружить индивидуальную метку тогда и только тогда, когда позиции метки различаются между их копиями. Пираты не смогут изменить необнаруженную

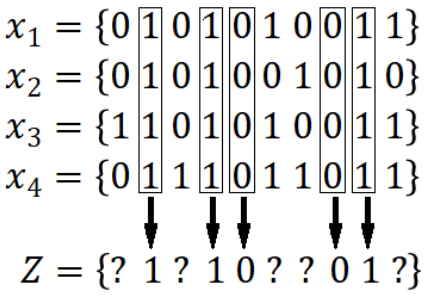


Рис. 1. Объединение копий цифрового объекта коалицией пиратов: x_i – последовательность в лицензионной копии; Z – пиратская последовательность

метку, не разрушив при этом объект с внедренным кодом.

Принцип коалиционной атаки заключается в том, что несколько пользователей системы поэлементно сравнивают копии своих цифровых продуктов, на одинаковых во всех последовательностях позициях символ сохраняется, а на различающихся позициях расставляют производные значения, придерживаясь какого-то алгоритма. Обычно такими символами являются биты. Для более наглядного представления процесса коалиционный атаки можно воспользоваться рис. 1. Пираты, используя свои индивидуальные метки x_1, x_2, x_3, x_4, создают нелицензионную метку Z. Если биты индивидуальных меток одинаковы на определенных позициях, то они сохраняются, в противном случае, биты заменяются по одной из стратегий, которую используют пираты.

Стратегии коалиционных атак на индивидуальные метки можно разделить на несколько типов [2]: выбор большинства, выбор меньшинства, случайный символ, фиксированный символ, линейная комбинация.

Описание антикоалиционных кодов и базовых понятий

Антикоалиционные коды представляют собой случайно созданные двоичные коды [1]. Правила формирования слов кода зависят от рассматриваемого подхода, но случайность – это обязательное условие.

Процесс защиты цифрового продукта правообладателя от коалиционных атак с помощью индивидуальных меток можно представить следующими этапами: построение антикоалиционных последовательностей; вставка последовательности в копию продукта; извлечение последовательности из пиратской копии продукта; поиск и определение по извлеченной последовательности участников коалиции.

Как и любые другие, антикоалиционные коды имеют основные параметры: количество пользователей в системе (количество слов), максимальный размер коалиции, параметр безопасности системы (вероятность ошибки ложного обвинения).

В работе будут рассмотрены четыре подхода к построению антикоалиционных кодов – Бонэ – Шоу, Тардоша, мультимедийные коды и случайные.

Коды Бонэ – Шоу

Коды Бонэ – Шоу были предложены в 1996 г. в работе [1] Даном Бонэ и Джеймесоном Шоу в качестве метода защиты цифровых данных от нелицензионного распространения. Суть метода заключалась в том, что каждое кодовое слово строилось как код-произведение кодов из повторяющихся блоков символов со случайной перестановкой и кодов Рида – Соломона. Пример внутреннего кода C, содержащего пять слов:

$$C = \begin{pmatrix} \overbrace{11\ldots1}^{F_1} & \overbrace{11\ldots1}^{F_2} & \overbrace{11\ldots1}^{F_3} & \overbrace{11\ldots1}^{F_4} & 1 \\ 00\ldots0 & 11\ldots1 & 11\ldots1 & 11\ldots1 & 2 \\ 00\ldots0 & 00\ldots0 & 11\ldots1 & 11\ldots1 & 3 \\ 00\ldots0 & 00\ldots0 & 00\ldots0 & 11\ldots1 & 4 \\ 00\ldots0 & 00\ldots0 & 00\ldots0 & 00\ldots0 & 5 \end{pmatrix}.$$

От длины блока F_i зависит надежность работы системы, а от их количества – максимальный размер обнаруживаемой коалиции. Слова кода C переставляются случайным образом, перестановка является секретом системы. Для декодирования кода используется вес блоков обнаруженного кодового слова.

Коды Бонэ – Шоу являются самыми известными антикоалиционными кодами. Они показывают хороший результат поиска участников коалиции, но их существенным недостатком является большой объем памяти, который требуется для их построения, и очень большие длины меток, которые необходимо внедрять в цифровой объект.

В работе [3] рассматривалось построение двух новых схем декодирования, которые защищены от коалиции размером c_0. Предложенные схемы показали хорошую скорость поиска участников коалиции при более коротких кодовых словах, чем в оригинальной схеме Бонэ – Шоу. Использование алгоритма декодирования Кеттера – Варди для первой предложенной схемы, которая называется BS-RC-SD, дает сложность декодирования $O(n)$. Другая схема име-

ет лучшую скорость декодирования, но при этом ее сложность равна $O(n \cdot M)$, что совпадает со сложностью алгоритма, предложенного Бонэ и Шоу. Проблема данного алгоритма заключается в том, что для его реализации необходима работа в мягком канале, что приводит к появлению новой проблемы – задача построения мягкого канала.

В [4] была предложена новая схема, в которой показывалось, что кодовые слова можно было сделать короче, чем предполагалось изначально. Предложенный алгоритм имеет стабильную скорость поисков участников коалиции. Недостатком является ограниченность в количественном плане параметра c_0. При $c_0 > 3$ возникают ошибки безрезультатного поиска виновного. Предложенный внутренний код, который в работе называют AG-кодом, требует более крупных алфавитов, чем случайные коды, что делает внутренний код неэффективным в качестве внутренних кодов в алгоритме Бонэ – Шоу.

Преимущество антикоалиционных кодов, предложенных Бонэ и Шоу, заключается в том, что они имеют простой алгебраический декодер и могут быть легко построены для любого размера коалиции пиратов, любого количества пользователей и любой вероятности ошибок.

Коды Тардоша

Коды Тардоша впервые были описаны в 2003 г. Габором Тардошом в работе [5], в которой он описал схему построения индивидуальных меток для каждой копии продукта и поиск по пиратской индивидуальной метки участников коалиции. Данные коды предназначены для n пользователей, c_0 – максимальный размер коалиции, вероятность ошибки ε, и имеют длину слова $O\left(c_0^2 \ln(n/\varepsilon)\right)$.

В работе Бонэ – Шоу [1] длина кода приблизительно равна квадрату длины, предложенной Тардошем, что служит доказательством явного преимущества последовательностей Тардоша над кодами Бонэ – Шоу по длине кодового слова. Код представляет собой случайную матрицу, которая строится над двоичным алфавитом со случайной вероятностью 0 и 1 в каждой строке. Пример кода показан на рис. 2.

Также в работе доказывается, что предложенная длина кодов является асимптотически оптимальной по длине кода для поиска участников коалиции с произвольной стратегией.

В [6] было продемонстрировано новая конструкция антикоалиционного кода, которая похожа на конструкцию Тардоша, но обеспечивает меньшую длину кода и позволяет использовать коды с произвольными алфавитами. В работе было доказано, что новая конструкция улучшает коды Тардоша в десять раз в отношении длины кода. Для q-ичных алфавитов размер кода может быть дополнительно уменьшен. Численные результаты показывают, что снижение длины кода на 35 % возможно при $q = 3$ и на 80 % при $q = 11$. При всех преимуществах данного алгоритма, он имеет явный недостаток – из-за дополнительных вычислений скорость поиска участников сговора существенно увеличивается.

В [7] рассматривалось улучшение процедуры декодирования кода Тардоша, при этом, аналогично работе Тардоша, характеристики декодера остаются устойчивыми к любому виду атак. Улучшение декодера происходит благодаря оценке атаки сговора, с помощью алгоритма «Expectation-Maximization» [7]. Также в статье [7] используется «основное допущение маркирования» [1], которое используется в предложенном алгоритме. Однако данная стратегия декодирования имеет недостатки. Во-первых,

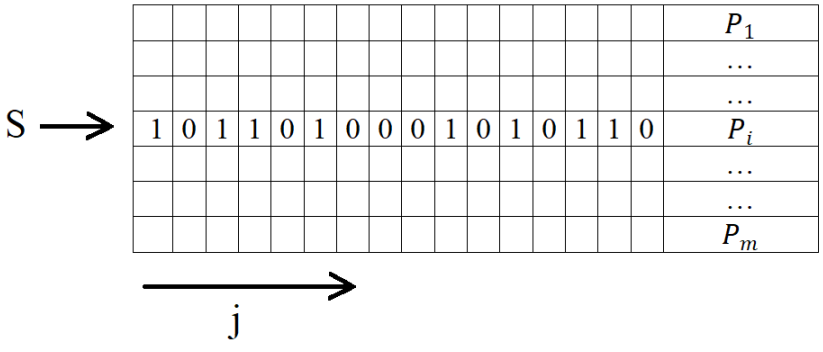


Рис. 2. Матрица m×n кодов Тардоша длиной кода m и количеством пользователей n

стратегия независимого декодирования имеет слишком сильную связь между алгоритмом обвинения и генерацией кода, поскольку алгоритм был разработан для определенной функции распределения вероятностей $f(p)$. Работа [9] показала, что с точки зрения теории игр $f(p)$ сильно зависит от количества участников сговора и может значительно отклоняться от $f(p)$, первоначально предложенного Тардошем. Во-вторых, при возникновении в канале случайных ошибок производительность декодирования быстро снижается. Подводя итог, можно сделать вывод, что предложенная схема имеет нестабильную работу, это может внести неточности в результаты проведения тестов. В свою очередь, система, предложенная Тардошом, обеспечивает устойчивую производительность, независимо от стратегии сговора, за счет высокой оптимальности, как описывалось в работе [5].

В работе [10] отмечалось, что большой акцент в области кодов Тардоша уделялся длине кода, а процессом поиска участников коалиции пренебрегали. В некоторых случаях может потребоваться быстрый декодер для предоставления ответов в режиме реального времени, например, в случае прямых трансляций спортивных передач. В статье рассматривалось моделирование более «умного» алгоритма декодирования на основе (приблизительного) поиска ближайшего соседа. Благодаря тому, что процесс декодирования индивидуальной метки не связан с ее кодированием и встраиванием, предложенный декодер может заменить предыдущий, не влияя на процесс кодирования и встраивания метки. Предложенный алгоритм показал хорошие результаты времени декодирования при небольших размерах коалиции c. При увеличении c результаты показывают лишь незначительные улучшения. Недостатком данного подхода является то, что при использовании алгоритма с поиском ближайшего соседа требуется значительно большее выделение памяти, чем для стандартных кодов Тардоша.

Мультимедийные коды

Как было показано в [1], не существует мультимедийных кодов цифровых водяных знаков, способных полностью восстановить коалицию недобросовестных пользователей в условиях общей линейной атаки и целенаправленного шума. В то же время в работе [11] было показано, что такие коды существуют, если сузить класс атак до атаки усреднения. Возникающая математическая задача близка к задаче построения сигнатурных кодов для двоичного суммирующего канала с шумом.

Мультимедийные коды, конструкция и алгоритмы декодирования которых предложены в работе [11], имеют ряд ограничений, связанных с моделью канала, в которой они работают. Рассмотрим математическую модель защиты мультимедийного контента от нелегального перераспределения, рассматриваемую в данной работе. Мультимедийный контент представляется как N-мерный вектор $\mathbf{x}$ над полем R вещественных чисел. Имеется дистрибьютор, который видоизменяет $\mathbf{x}$ специальным образом для каждого пользователя так, чтобы если коалиция недобросовестных пользователей подделает $\mathbf{x}$, то он может найти всех членов коалиции. Для этого дистрибьютор выбирает m попарно ортогональных векторов $\mathbf{f}_1,\ldots,\mathbf{f}_m \; R^N$ одинаковой длины (для простоты – длины *1*), которые известны только ему, – это важное предположение, которое будет использоваться в дальнейшем. Затем дистрибьютор формирует так называемые цифровые водяные знаки (ЦВЗ) как линейные комбинации этих векторов с двоичными коэффициентами (известен и другой вариант «модуляции» ЦВЗ, когда используются коэффициенты из {–1, +1}).

ЦВЗ $\mathbf{w}_j$, предназначенный j-му пользователю, имеет вид:

$$\mathbf{w}_j = \sum_{i=1}^{m} h_{ij}\mathbf{f}_i,$$

где $h_{ij} \in \{0, 1\}$. Вложение ЦВЗ осуществляется аддитивно, т. е. дистрибьютор выдает j-му пользователю $\mathbf{y}_j = \mathbf{x} + \mathbf{w}_j$, как копию $\mathbf{x}$, где предполагается, что длина вектора $\mathbf{x}$ много больше длины ЦВЗ $\mathbf{w}_j$ (т. е. $||\mathbf{x}|| >> ||\mathbf{w}_j||$ ($||\cdot||$ здесь и далее обозначает евклидову норму вектора), чтобы копия $\mathbf{y}_j$ мало отличалась от оригинала $\mathbf{x}$.

Пусть имеются M пользователей и среди них коалиция $A \subset [M]$ недобросовестных пользователей. Линейная атака состоит в том, что коалиция A генерирует поддельную копию $\mathbf{y}$ как линейную комбинацию имеющихся у нее копий y_j с вещественными коэффициентами $\lambda_1, \ldots, \lambda_M$, такими, что $\sum_{i=1}^{M} \lambda_i = 1, \lambda_i > 0$, для всех $i \in A$ и $\lambda_i = 0$ для всех $i \notin A$, т. е.

$$y = \sum_{j=1}^{M} \lambda_j y_j = \sum_{a \in A} \lambda_a y_a.$$

Так как $\sum_{i=1}^{M}\lambda_i = 1$, то $\mathbf{y} = x + \sum_{j=1}^{M}\lambda_j w_j$, а так как все $\lambda_i \geq 0$, то, в силу неравенства треугольника (для нормы), имеем:

$$\|\mathbf{y} - \mathbf{x}\| = \left\|\sum_{i=1}^{M}\lambda_i w_i\right\| \leq \sum_{i=1}^{M}\lambda_i \|w_i\| \leq \max_j \|w_j\| \leq \|x\|,$$

и, следовательно, y является достаточно хорошей копией оригинала x.

Так как дистрибьютор знает значение x, то он может определить, что **y** – это нелегальная копия x, и найти всех участников коалиции, создавших **y**, если множество $W = \{w_1,\ldots,w_M\}$ является мультимедийным кодом.

Замечание. Всюду далее мы предполагаем, что значение L (размер коалиции) фиксировано.

Среди всех линейных атак особо выделяется атака усреднения, для которой $\lambda_j = |A|^{-1}$ при $j \in A$, и $\lambda_j = 0$ в противном случае. Ранее, начиная с первых работ по этой тематике, считалось, что «атака усреднения является наиболее справедливой для участников коалиции, чтобы избежать обнаружения» [12]. Поэтому все работы до [13] ограничивались рассмотрением только атаки усреднения.

В статье [11] было показано, что атака усреднения намного слабее общей линейной атаки, по крайней мере, в случае целенаправленного шума, для которого были разработаны мультимедийные коды.

Схема случайного кодирования

Общие параметры схемы:

M – общее количество участников;

L – размер атакующей коалиции;

n – длина метки (она же кодовое слово), по которой необходимо принять решение о виновности пользователя.

Каждому участнику присваивается уникальная метка $X^{(j)}$, эта метка формируется случайным образом посимвольно, каждый символ $x_i^{(j)}$ на позиции i выбирается случайно равновероятно из двоичного алфавита {0; 1}. Таким образом строится случайный нелинейный код, содержащий M слов длины n каждое.

Для проведения атаки собираются случайным образом L атакующих участников, объединяют свои кодовые слова $X^{(j_1)}, X^{(j_2)}, \ldots, X^{(j_L)}$ и на их основе создают новое слово Y, в котором на каждой позиции равновероятно выбирается символ из слов $X^{(j_1)}, X^{(j_2)}, \ldots, X^{(j_L)}$, т. е.

$$y_i = \begin{cases} x_i^{(j_1)} \\ \vdots \\ x_i^{(j_L)} \end{cases}$$

любому из значений.

Базовая процедура декодирования, которая была предложена и исследована в прошлых этапах проекта, выглядит следующим образом.

Для определения участников коалиции подсчитывается доля совпадений принятого слова Y со всеми словами кода. $F^{(j)} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} T_i^{(j)}$, $T_i^{(j)} = \begin{cases} 1, X_i^{(j)} = Y_i \\ 0, X_i^{(j)} \neq Y_i \end{cases}$. Получившиеся значения функции обвинения $F^{(j)}$ сортируются по возрастанию и в качестве виновных пользователей могут быть выбраны:

– L владельцев слов с максимальным значением $F^{(j)}$;

– единственный участник с максимальным значением $F^{(j)}$;

– все владельцы слов, значение $F^{(j)}$ у которых превышает фиксированный порог T.

Сравнительный анализ рассмотренных кодов

В ходе предыдущих исследований были рассмотрены наиболее значимые результаты, полученные в области построения и декодирования антикоалиционных кодов. Были рассмотрены коды, предложенные в работах Бонэ – Шоу [1], Тардоша [5] и мультимедийные [11]. Все они позволяют достичь произвольной заранее определенной вероятности ошибки ложного обвинения, но при этом имеют достаточно большие длины. В таблице приведены сравнительные значения длин кодов для алфавита размера q=2, количества пользователей M = 1 000 000, вероятности ошибки 0,1 и двух размеров коалиции L=2 и L=6.

Сравнение длин кодов

Тип кода	Длина кода при L=2, бит	Длина кода при L=6, бит
Бонэ – Шоу [1]	80 000	8 000 000
Тардоша [5]	6450	58 000
Мультимедийный [11]	100	300
Случайный код	100	200

Таким образом, наиболее короткими кодами являются случайные и мультимедийные коды, к их недостаткам можно отнести переборные

алгоритмы декодирования, требующие больших вычислительных ресурсов. Кроме того, данные коды ориентированы на различные модели ошибок, а именно – случайные коды лучше показываются себя при случайной стратегии атакующих. Тогда как мультимедийные коды работают только при линейной комбинации кодовых слов.

Заключение

Данная работа была посвящена анализу существующих подходов к построению антиколиционных кодов. Изучены работы, описывающие алгоритмы построения и декодирования данных кодов. Произведен сравнительный анализ моделей безопасности, в рамках которых были разработаны различные коды. Выделены основные характеристики, влияющие на применимость данных кодов, и произведено количественное и качественное сравнение существующих решений.

Как показало сравнение, наименьшие длины имеют мультимедийный и случайный коды при прочих равных параметрах, но они же имеют наибольшую вычислительную сложность процедуры декодирования. При этом наиболее вычислительно эффективные коды Бонэ – Шоу имеют максимальную длину, что делает их неприменимыми к малым объектам авторского права.

Список источников

1. *Boneh D., Shaw J.* Collusion-secure fingerprinting for digital data // IEEE Transactions on information theory. 1998. Vol. 44. P. 1897–1905.

2. *Löfvenberg J., Lindkvist T.* Some simple pirate strategies. URL: https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=b142d2a548b2bccba4a0abf9b0722c1146a4aa22 (дата обращения: 15.11.2023).

3. *Schaathun H. G.* The Boneh – Shaw fingerprinting scheme is better than we thought // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. June 2006. Vol. 1, no. 2. P. 248–255.

4. *Schaathum H. G., Fernandez M.* Soft decision decoding of Boneh – Shaw fingerprinting codes // IEICE Transactions on fundamentals of electronics communications and computer sciences. 2006. Vol. E89-A, № 10. P. 2603–2608.

5. *Tardos G.* Optimal probabilistic fingerprint codes // Proc. ACM symp. on theory of computing. N. Y., USA, 2003. P. 116–125.

6. *Skoric B., Katzenbeisser S., Celik M. U.* Symmetric Tardos fingerprinting codes for arbitrary alphabet sizes. // Designs, codes and cryptography. 2008. Vol. 46, № 2. P. 137–166.

7. *Furon T., Pérez-Freire L.* EM вecoding of Tardos traitor tracing codes // MM&Sec '09: Proceedings of the 11th ACM workshop on ьultimedia and security. 2009. P. 99–106.

8. Expectation maximization decoding of Tardos probabilistic fingerprinting code / A. Charpentier, F. Xie, C. Fontaine, T. Furon // SPIE media forensics and security. 2009. P. 1–15.

9. *Amiri E., Tardos G.* High rate fingerprinting codes and the fingerprintging capacit. // Proc. of 20th Annual ACM-SIAM Symposium on discrete algorithms (SODA – 2009). 2009. P. 336–345.

10. *Laarhoven T.* Nearest neighbor decoding for Tardos fingerprinting codes // IH&MMSec. 2019. P. 182–187.

11. Существование и конструкции мультимедийных кодов, способных находить полную коалицию при атаке усреднения и шуме / Е. Е. Егорова, М. Фернандес, Г. А. Кабатянский, И. Мяо // Проблемы передачи информации. 2020. Т. 56, № 4. С. 97–108.

12. *Cheng M., Miao Y.* On anti-collusion codes and detection algorithms for multimedia fingerprinting // IEEE Transactions on information theory. 2011. Vol. 57, is. 7. P. 4843–4851.

13. Signature codes for the a-channel and collusion-secure multimedia fingerprinting codes / E. Egorova, M. Fernandez, G. Kabatiansky, M. H. Lee // Proc. 2016 IEEE Int. symp. on information theory (ISIT'2016) (Barcelona, Spain, July 10–15 2016). 2016. P. 3043–3047.

УДК 004.9.62.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-9-12**

А. А. Бардовский*
аспирант
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ОБЛАСТИ IIoT

Приведен сравнительный анализ функциональности технологий доверенных вычислений в контексте обеспечения безопасности устройств промышленного Интернета вещей.
Ключевые слова: *доверенная платформа, дискретный модуль доверенной платформы, доверенная среда выполнения, промышленный Интернет вещей.*

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

ANALYSIS OF TRUST COMPUTING TECHNOLOGIES FOR THEIR APPLICATION IN THE IIoT FIELD

A comparative analysis of the functionality of trusted computing technologies is provided in the context of ensuring the security of Industrial Internet of Things devices.
Keywords: *trusted platform, discrete trusted platform module, trusted execution environment, industrial Internet of things.*

Быстрый рост числа атак на безопасность и конфиденциальность промышленных автоматизированных систем актуализирует потребность в непрерывной защите как конечных устройств IT-инфраструктуры, так и серверных хостов. Многие современные производители полагаются на технологии доверенных вычислений для защиты своих устройств и платформ. В случае с промышленными устройствами атаки могут иметь очень серьезные последствия, особенно если целью атаки являются объекты критической информационной инфраструктуры [1, 2]. Важно быть уверенным в том, что устройство не было подменено на другое, прошивка не была изменена и т. д. Технологии доверенных вычислений дают возможность проверить это.

В данной статье анализируются технологии доверенных вычислений: Trusted Platform Module (TPM) [3], Trusted Execution Environment (TEE) [4], Hardware Security Module (HSM) [5], а также схожие с ними, с целью их использования во встраиваемых системах – промышленных устройствах Интернета вещей (IIoT).

В контексте спецификаций Trusted Computing Group (TCG) [3] термин «доверие» означает ожидаемое (предсказуемое) поведение. Однако предсказуемое поведение не обязательно является поведением, заслуживающим доверия. Чтобы определить ожидаемое поведение платформы, необходимо определить ее идентичность в том виде, в каком она соотносится с поведением платформы. Доверенная платформа в самом общем смысле – это совокупность ресурсов, которые могут доказать, что она может предоставлять доверенные услуги и предоставляет доверенные услуги.

Корень доверия (RoT) [6] – это основа доверия внутри вычислительной системы, которая обеспечивает целостность, конфиденциальность и подлинность операций и данных. Он служит отправной точкой для установления доверия путем проверки и защиты критически важных компонентов системы, включая оборудование, программное обеспечение, встроенное программное обеспечение (ПО) и данные.

Существует множество технологий и концепций, которые способствуют созданию доверенных вычислений. Основными из них, как указано выше, являются TPM, TEE и HSM.

TPM – это специальный аппаратный модуль безопасности, интегрированный в современные вычислительные устройства. Этот дискретный чип или встроенное ПО обеспечива-

ет безопасную основу для различных функций, связанных с безопасностью, в вычислительной системе. Целью TPM является защита конфиденциальных данных, проверка целостности системы и защита от несанкционированного доступа или взлома.

TEE – это безопасная и изолированная область внутри процессора, которая обеспечивает выполнение доверенного кода и данных в защищенной среде. TEE создают безопасный анклав, отдельный от основной операционной системы, предлагая более высокий уровень безопасности для конфиденциальных вычислений и данных.

HSM – это специальное аппаратное устройство или модуль, предназначенный для управления криптографическими ключами и их защиты, выполнения безопасных криптографических операций.

Данные технологии имеют немного отличающиеся цели: TPM фокусируется на целостности системы, безопасном хранении и аттестации системы. TEE создает безопасную среду выполнения для доверенного кода и данных. HSM управляет криптографическими ключами и выполняет безопасные криптографические операции. Их краткое сравнение показано в табл. 1.

Согласно данным табл. 1, в силу своей функциональности, HSM не имеет возможности измерения платформы, а значит, его функциональность недостаточна, чтобы предоставить RoT. Тем временем TPM и TEE такую возможность имеют. Кроме того, HSM, по сравнению с TPM и TEE, обладает существенно высокой стоимостью (на порядок дороже), что не всегда экономически обосновано при широкомасштабном их применении в промышленной инфраструктуре. По этой причине далее в статье акцент сделан на технологиях TPM и TEE. Рассматривая современные существующие зарубежные реализации данных технологий, изначально следует отметить, что не все производители согласились производить свои изделия в соответствии со спецификациями TPM и TEE. В частности, такие гиганты, как *Samsung* и *Apple*, для мобильных устройств предпочитают опираться на собственные концепции доверительных вычислений (табл. 2), хотя большая часть функциональности этих спецификаций также поддерживается и является своеобразным гибридом TEE и TPM.

Важно заметить, что технологии от *Samsung* и *Apple* невозможно применить в собственных проектах. В данной статье они рассматриваются как альтернатива TEE и TPM. В частности, решения Apple Platform Security и Samsung knox представляют собой платформы безопасности. Они включают в себя не только аппаратный чип, а также доверенные приложения, загрузчик, функции ядра системы и другие элементы [7–9].

Последняя спецификация TPM 2.0 Mobile датируется 2015 г. [3]. Также на официальном

Таблица 1

Сравнение технологий TPM, TEE, HSM

Показатель	Технология		
	TPM	TEE	HSM
Тип устройства	Аппаратный или программный модуль безопасности	Безопасная изолированная среда внутри процессора	Выделенное аппаратное устройство/модуль
Основные функции	Обеспечивает безопасное хранение криптографических ключей, сертификатов; измеряет и проверяет целостность системы во время процесса загрузки; поддерживает криптографические операции, такие как шифрование, дешифрование и подпись; поддерживает аттестацию для подтверждения конфигурации и надежности системы	Создает изолированный анклав для выполнения доверенного кода и конфиденциальных операций; защищает от атак путем изоляции и защиты конфиденциальных вычислений и данных	Безопасно генерирует, хранит и управляет криптографическими ключами; выполняет безопасные криптографические операции (шифрование, дешифрование, подпись)
Цели	Целостность системы; безопасное хранение; криптографические операции; аттестация системы	Безопасная среда выполнения; изоляция, защита конфиденциальных вычислений	Безопасное управление ключами; криптографические операции; защита на аппаратном уровне

Таблица 2

Сравнение технологий TPM 2.0, TPM Mobile, Samsung knox, Apple Platform Security

Функциональность	TPM 2.0	TPM Mobile	Samsung knox	Apple Platform Security	TEE 1.3
Поддерживается на	ПК, сервера, сетевое оборудование, встроенные системы.	Мобильные устройства, которые заявляют о соответствии эталонной мобильной архитектуре TPM 2.0	Поддерживается на устройствах Samsung, OS Android	Устройства Apple	Мобильные устройства, встроенные системы
Представляет собой	Дискретный компонент, интегрированный компонент, прошивка, программное обеспечение, виртуальный компонент	Доверенное приложение, работающее в защищенной среде	Система безопасности, которая включает TEE (ARM trustzone, выделенный гипервизор или аппаратный TEE) и доверенные приложения	Система безопасности, которая включает аппаратный чип TEE и доверенные приложения	Безопасная область внутри основного или отдельного процессора
Аттестация работоспособности устройства	Да	Да	Да	Да	Да
Шифрование данных	Да	Да	Да, AES-256-XTS	Да, AES	Да
Доверенная загрузка	Да	Да (7 PCR)	Да	Да	Да
Защита ядра в реальном времени	Нет	Нет	Да	Нет	Поддерживается
Блокировка при взломе	Да	Да	Да	Да	Да
Собственное безопасное хранилище	Да	Да (около 6 Кб)	Да	Да	Нет
Генератор СЧ	Да	Да	Да, DRBG	Да, CTR_DRBG	Поддерживается
Безопасный доступ к устройствам периферии	Нет	Нет	Да	Да	Поддерживается

сайте Trusted Computing Group отсутствуют устройства, которые сертифицированы на соответствие этой спецификации. Скорее всего, данная технология уже устарела и не используется.

Начиная с 2021 г. *Samsung* начала устанавливать в свои устройства TEE собственной разработки – Samsung vault, вместо использования TEE, входящую в состав основного процессора. Samsung vault – это независимый процессор на SoC, хранилище которого физически отделено от остальной части SoC.

Samsung knox и Apple Platform Security идейно в реализации во многом схожи, но в процессе аналитического обзора было обнаружено отличие: *Samsung* фокусируется на обеспечении безопасности для бизнеса и корпоративных пользователей, в то время как Apple фокусируется на обеспечении безопасности обычных пользователей.

Применение TEE в IIoT также возможно в силу того, что даже недорогие процессоры поддерживают TEE (например, процессоры arm в raspberry pi). Однако TEE не обеспечивает того же уровня защиты, что и TPM или HSM, но позволяет запускать пользовательские доверенные приложения. Важно заметить, что TEE не имеет собственного физического безопасного хранилища для якорного корня доверия, а использует внешнее [7–11].

Следовательно, для большинства IIoT устройств лучшим выбором на текущий момент для поддержки доверенных вычислений является TPM-модуль, так как он предоставляет хороший уровень безопасности и имеет достаточный функционал. В том случае, если функционала TPM недостаточно, использование TEE, встроенного в основной процессор устройства, будет хорошим дополнительным решением. Если же требуется высокий уровень безопас-

ности, можно использовать аппаратный TEE с внешним безопасным хранилищем, как это реализовано в технологии от *Samsung*.

В заключение следует отметить, что в настоящее время прослеживается синергия TPM- и TEE-технологий, а решения *Samsung* и *Apple* демонстрируют востребованность такого гибридного подхода не только в IIoT, но и в более широкой сфере применения

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Автономной некоммерческой организации «Национальный технологический центр цифровой криптографии» в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Разработка комплекса мер, направленных на обеспечение массовости использования отечественной криптографии (TLS с ГОСТ) в российском сегменте сети Интернет» (шифр «Рассвет»).

Список источников

1. *Bezzateev S., Fomicheva S.* Soft multi-factor authentication // WECONF – 2020. Wave electronics and its application in information and telecommunication systems. 2020. P. 9131537.

2. *Фомичева С. Г.* Моделирование мобильных агентов в киберфизических системах // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: сб. ст. XXIII Междунар. науч. конф. СПб., 2020. С. 368–374.

3. TCG: TPM 2.0 mobile reference architecture. URL: https://trustedcomputinggroup.org/resource/tpm-2-0-mobile-reference-architecture-specification/ (дата обращения: 02.12.2023).

4. Global platform: the trusted execution environment white paper. URL: https://globalplatform.org/wpcontent/uploads/2018/04/GlobalPlatform_TEE_Whitepaper_2015.pdf (дата обращения: 02.12.2023).

5. Secure technology alliance: trusted execution environment (TEE) 101: A Primer. URL: https://www.securetechalliance.org/wp-content/uploads/TEE-101-White-Paper-FINAL2-April-2018.pdf (дата обращения: 02.12.2023).

6. Hardware security module. URL: https://informationsecurityasia.com/what-is-a-hardware-security-module-hsm/ (дата обращения: 02.12.2023).

7. Global platform technology root of trust definitions and requirements. URL: https://globalplatform.org/wpcontent/uploads/2018/06/GP_RoT_Definitions_and_Requirements_v1.0.1_PublicRelease_CC.pdf (дата обращения: 02.12.2023).

8. Samsung. Samsung knox. 2020. URL: https://docs.samsungknox.com/admin/whitepaper (дата обращения: 02.12.2023).

9. Apple: AppleT2 SecurityChip. Security overview. URL: https://www.apple.com/jp/mac/docs/Apple_T2_Security_Chip_Overview.pdf (дата обращения: 02.12.2023).

10. Apple: Apple platform security. URL: https://help.apple.com/pdf/security/en_US/apple-platform-security-guide.pdf (дата обращения: 02.12.2023).

11. Samsung: Samsung knox white paper (version 1.5, july 2021). URL: https://image-us.samsung.com/SamsungUS/samsungbusiness/solutions/topics/iot/071421/Knox-Whitepaper-v1.5-20210709.pdf (дата обращения: 02.12.2023).

УДК 004.056 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-13-17**

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

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

Представлен обзор актуальных проблем обеспечения информационной безопасности (ИБ) автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП), нормативно-правового регулирования и государственного контроля в области критических информационных инфраструктур. Рассмотрена статистика угроз ИБ и методов их реализации.
Ключевые слова: *информационная безопасность, автоматизированная система управления технологическим процессом.*

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

ANALYSIS OF THE PROBLEMS OF ENSURING INFORMATION SECURITY OF INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS

A brief overview of the problems of ensuring information security of industrial control systems, regulatory regulation and state control in the field of critical information infrastructures is presented. The statistics of information security threats and methods of their implementation are considered.
Keywords: *information security, industrial control system.*

Введение

В современном мире на фоне общей цифровизации стремительно возрастает количество целевых кибератак в отношении предприятий промышленного сектора. Данная ситуация требует особого внимания к вопросам обеспечения информационной безопасности (ИБ) автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) для сохранения стратегической стабильности критических информационных инфраструктур.

Значимые аспекты обеспечения ИБ АСУ ТП

В эпоху цифровой трансформации ключевым направлением технологического развития промышленности является переход на полностью автоматизированное цифровое производство, предполагающее внедрение киберфизических систем, промышленного Интернета вещей (IoT), облачных вычислений, искусственного интеллекта (ИИ), аналитики больших данных (Big Data) и машинного обучения.

Внедрение новых технологий позволяет повысить конкурентоспособность промышленных предприятий, улучшить производительность и снизить инвестиционные и эксплуатационные затраты. Вместе с тем необходимость тесной интеграции промышленных систем автоматизации с локальными и глобальными компьютерным сетями создает предпосылки возникновения новых уязвимостей, угроз и рисков информационной безопасности.

В условиях наличия геополитических противоречий в мире промышленные инфраструктуры, функционирующие на базе топливно-энергетических комплексов, подвержены высоким рискам вмешательства террористических, экстремистских организаций и иных неблагожелательный группировок, целью которых является нарушение стабильной работы АСУ ТП промышленных объектов.

АСУ ТП промышленного объекта – это человеко-машинная система (совокупность технических, программных и людских ресурсов), обеспечивающая сбор и обработку информации для автоматизации процессов управления технологическим оборудованием в соответствии с параметрами, определенными оператором системы [1].

Нарушение штатного функционирования АСУ ТП способно привести к множеству деструктивных, критических последствий (социального, политического и экономического характера), повлечь за собой возникновение катастрофы техногенного или экологического характера, последствия для обеспечения обороны страны и жизнедеятельности населения.

Государством уделяется особое внимание вопросам обеспечения ИБ АСУ ТП и противодействию угрозам, в силу внедрения новых информационных технологий, предоставляющих злоумышленникам все большие возможности для проведения компьютерных атак.

Разработка и внедрение мер по защите АСУ ТП, повышению уровня устойчивости функционирования, стабильности исполнения реализуемых технологических процессов рассматривается как приоритетная задача на государственном уровне.

Вопросам обеспечения ИБ АСУ ТП посвящено множество российских и международных нормативных и методических документов [2, 3], научных работ российских и зарубежных авторов [4, 5].

В России к стратегически значимым, определяющим понятийный аппарат, основные подходы и рекомендации к комплексному выстраиванию системы обеспечения ИБ АСУ ТП, относятся следующие нормативные правовые акты, организационные и методические документы [6, 7].

В большинстве случаев, согласно критериям государственных органов, АСУ ТП промышленного сектора относятся к объект-критической информационной инфраструктуры Российской Федерации (КИИ). При определенных показателях являются значимыми объектами КИИ категорированные информационные системы, телекоммуникационные сети, системы автоматизированного управления.

Комплексный подход при внедрении нормативной базы позволяет сфокусировать внимание государственных структур и отечественных организаций на оперативном исполнении законодательных требований, в части реализации функций по обеспечению безопасности, эксплуатируемых объектов КИИ (повышение компетенций сотрудников в области ИБ, определение дополнительных функций и зон ответственности, создание подразделений по безопасности, категорирование объектов КИИ, проектирование и внедрение организационных и технических, в отдельных случаях компенсирующих мер защиты, выполнение работ по импортозамещению программного обеспечения (ПО) и оборудования, реализация функций непрерывного мониторинга и реагирования на компьютерные инциденты, включая подключение к информационным структурам типа ГосСОПКА) [8].

Вместе с тем текущая тенденция увеличения кибератак, усложнения их методов и технологий в отношении АСУ ТП объектов КИИ вынуждают органы государственного контроля усилить меры контроля состояния технической защиты информации и мониторинга текущего состояния ИБ АСУ ТП объектов КИИ, создавать информационные базы данных для контроля субъектов и объектов КИИ [9].

ФСТЭК России в 2023 г. была проведена оценка защищенности более 900 объектов КИИ, по результатам которой было выявлено около 600 нарушений (стандартные пароли, подключение к внешним вычислительным сетям, отсутствие мероприятий по выявлению и устранению уязвимостей, поверхностное понимание архитектуры и объектов защиты КИИ).

В целом отмечается, что ситуация в сравнении с 2022 г. практически не изменилась. Наличие большого числа критических уязвимостей в программном обеспечении, вызванного уходом иностранных вендоров и отказом выполнять обязательства по технической поддержке, являются ключевой проблемой АСУ ТП объектов КИИ.

В таких условиях приоритетными мерами по обеспечению безопасности объектов КИИ специалисты ИБ называют межсетевое экранирование, антивирусную защиту и контроль подключаемых устройств согласно отчету о результатах исследования безопасности АСУ ТП объектов КИИ аналитическим центром «ИнфоВотч» (*InfoWatch*) [10].

Центром реагирования на инциденты информационной безопасности промышленных инфраструктур «Лаборатории Касперского» (*Kaspersky ICS CERT*) опубликована статистика инцидентов ИБ первого полугодия 2023 г., указывающая, что подавляющее большинство атакованных организаций относится к промышленному сектору (рис. 1) [11].

В качестве основных источников угроз ИБ промышленных объектов *Kaspersky ICS CERT*

Рис. 1. Соотношение атакованных организаций по виду деятельности

отмечает Интернет (вредоносные скрипты и фишинговые веб-страницы JS и HTML), почтовых клиентов (документы MS Office, PDF, содержащие эксплойты, зловредные макросы и ссылки), съемные носители информации (исполняемые объекты, скрипты, autorun.inf, LNK-файлы (данный тип использовался для распространения червя Stuxnet CVE-2010-2568)) [12].

По данным отчета об экспертизе актуальных угроз ИБ компании *Positive Technologies* [13], основными методами атак в первой половине 2023 г. стало распространение вредоносного программного обеспечения (рис. 2).

В текущем году наибольший резонанс получили инциденты ИБ, по причине которых произошло нарушение технологического процесса или вывод из строя оборудования.

Mabanaft – Fuelling our tomorrow (дистрибьютор бензина и поставщик нефти). Группировка вымогателей BlackCat атаковала две дочерние компании группы Marquard & Bahls. В результате кибератаки автоматизированные

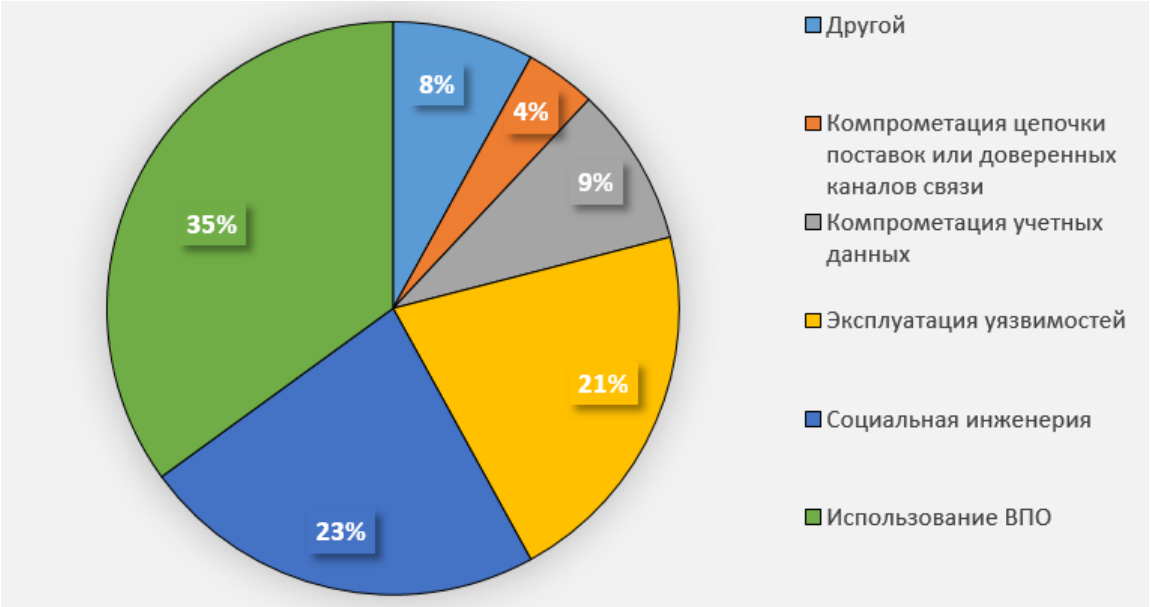


Рис. 2. Соотношение методов, используемых в кибератаках на организации

системы, используемые для наполнения резервуаров, были отключены. Поставки топлива на территории Северной Германии были прекращены.

Агрохаб «Селятино». Злоумышленники получили несанкционированный доступ к системам агрохолдинга и изменили параметры, отвечающие за поддержание температуры, с –24 на +30 °С. Катастрофу удалось предотвратить, однако, по оценке компании, могло быть испорчено 40 тысяч тонн замороженной рыбной и мясной продукции.

Nordex SE (проектировщик и производитель ветряных турбин). С помощью программы-вымогателя Conti злоумышленникам удалось атаковать производственные ресурсы. В результате кибератаки компании пришлось отключить все информационно-управляющие системы, отвечающие за контроль ветреных турбин.

Khouzestan Steel Company (иранская сталелитейная компания). В результате кибератаки компания была вынуждена остановить производство. Пострадало производственное оборудование для изготовления стальных заготовок, которое стало причиной пожара в цехе [14].

В целях исключения репутационных и экономических рисков, многие компании, подвергшиеся кибератакам, стараются скрыть и не предавать огласке информацию о компрометации и каких-либо последствиях. В этой связи общая статистика инцидентов ИБ, размещенная в средствах массовой информации, не в полной мере отражает текущее состояние и, тем более, точное число угроз ИБ. Также возможно предположить, что некоторые компании не знают о том, что они скомпрометированы (ввиду того, что злоумышленники не проявляли себя, занимаясь разведкой и сбором информации об ИТ-инфраструктуре). Общая картина, таким образом, складывается весьма тревожная.

Многообразие современных угроз ИБ позволяет распределить акценты в отношении необходимых функций средств защиты информации периметра технологической сети, обеспечивающих блокирование на ранних стадиях вредоносного трафика. К таковым относятся межсетевой экран (NGFW), системы предотвращения вторжений (IPS), глубокого анализа сетевого трафика (DPI, NTA), обнаружения и блокирования вредоносного трафика на конечных узлах (EDR, XDR) [10].

К сожалению, при условии наличия современных средств и систем ИБ полностью защитить АСУ ТП от взлома и проникновения в технологический периметр практически невозможно. Причиной этому является особый интерес злоумышленников к АСУ ТП из-за наличия выполняемых критических процессов. В случае их нарушения злоумышленник сможет оказать негативное влияние в масштабах города, округа и страны в целом.

Дополнительным фактором является отсутствие тесной взаимосвязи между специалистами, эксплуатирующими АСУ ТП и обеспечивающими их безопасность. Со стороны эксплуатации отсутствует осведомленность о событиях ИБ, которые могут негативно отразиться на управляемом ими технологическом процессе. Сторона, обеспечивающая безопасность, зачастую не владеет информацией о пороговых значениях параметров (состоянии) технологического процесса, режимах работы объекта в целом, чтобы своевременно провести анализ наличия критичных событий ИБ и при необходимости принять меры.

Заключение

В текущих реалиях общей цифровизации и неограниченного роста угроз ИБ промышленным предприятиям требуется уделить особое внимание вопросам создания комплексных систем безопасности, выбору оптимальных средств и систем защиты информации (СрЗИ), определению надежных цепочек поставок СрЗИ и услуг, связанных технически обслуживанием и сопровождением СрЗИ. Обеспечению непрерывного мониторинга событий безопасности для выявления активности вредоносного ПО на ранних стадиях, адекватным мерам противодействию современным угрозам ИБ и, вместе с тем, соответствию высоким требованиям регуляторов и государства, созданию условий для перевода практической, результативной кибербезопасности в число ключевых потребностей.

Список источников

1. *Скляр В. В.* Обеспечение безопасности АСУТП в соответствии с современными стандартами. 2018. 384 с.

2. Серия стандартов ISA/IEC 62443 «Security for industrial automation and control systems». URL: https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-iec-62443-series-of-standards (дата обращения: 20.11.2023).

3. ГОСТ Р 51583-2014. Защита информации. Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200108858 (дата обращения: 20.11.2023).

4. *Римша А. С.* Анализ средств обеспечения информационной безопасности АСУ ТП газодобывающих предприятий // Прикасп. журн.: управление и высокие технологии. 2019. № 3 (47). С. 102–119.

5. Tyson Macaulay, Bryan L. Singer. Cybersecurity for industrial control systems: SCADA, DCS, PLC, HMI, and SIS. 2016. 203 p.

6. Федеральный закон от 26 июля 2017 г. № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации». URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/zakony/federalnyj-zakon-ot-26-iyulya-2017-g-n-187-fz (дата обращения: 20.11.2023).

7. Основные нормативные правовые акты, организационные и методические документы по обеспечению безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации. URL: https://www.infowatch.ru/sites/default/files/analytics/files/kiberbezopasnost-kii-osnovnye-dokumenty-v-dve-tysyachi-dvadtsat-tretem-godu.pdf (дата обращения: 20.11.2023).

8. Нормативные документы в области ГосСОПКА. URL: https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/knowledge-base/terminology-gossopka-kii-full-version/#id3 (дата обращения: 20.11.2023).

9. Указ Президента РФ от 08.11.2023 № 846 «О внесении изменений в Указ Президента Российской Федерации от 16 августа 2004 г. № 1085 „Вопросы Федеральной службы по техническому и экспортному контролю“». URL: http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202311080017 (дата обращения: 25.11.2023).

10. Аналитический отчет InfoWatch. URL: https://www.infowatch.ru/analytics/analitika/issledovanie-kiberbezopasnosti-asu-tp-novye-podkhody (дата обращения: 25.11.2023).

11. Отчет об инцидентах промышленной кибербезопасности Kaspersky ICS CERT. URL: https://ics-cert.kaspersky.ru/publications/reports/2023/10/05/h1-2023-a-brief-overview-of-main-incidents-in-industrial-cybersecurity/ (дата обращения: 25.11.2023).

12. Угрозы систем промышленной автоматизации Kaspersky ICS CERT. URL: https://ics-cert.kaspersky.ru/publications/reports/2023/09/13/threat-landscape-for-industrial-automation-systems-statistics-for-h1-2023/ (дата обращения: 26.11.2023).

13. Аналитический отчет Positive Technologies Актуальные киберугрозы. URL: https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2023-q2/ (дата обращения: 26.11.2023).

14. Сборник исследований по практической безопасности Positive Research 2023. URL: https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/positive-research-2023-rus.pdf (дата обращения: 27.11.2023).

УДК 004.056; 519.812 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-18-21**

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

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОТКРЫТЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАНТОВОГО ПРОТОКОЛА BB84

Рассматриваются актуальные проблемы и задачи обеспечения информационной безопасности в открытых каналах связи. Для реализации классических схем информационной безопасности во многих случаях используются псевдослучайные числа. В статье рассматриваются варианты генерации псевдослучайных чисел с использованием квантового протокола BB84, что позволяет решить задачу получения псевдослучайных чисел для протоколов и алгоритмов, обеспечивающих информационную безопасность при использовании открытых каналов связи.
Ключевые слова: *BB84, распределение общих ключей, коды Рида – Соломона, коррекция ошибки.*

R. G. Burlin*
PhD Student
S. V. Bezzateev*
Dr. Sc., Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INFORMATION SECURITY ENSURING FOR OPEN COMMUNICATION CHANNELS USING BB84 QUANTUM PROTOCOL

The paper deals with the actual problems and tasks of information security in open communication channels. For realization of classical schemes of information security in many cases pseudorandom numbers are used. The article considers variants of generation of pseudorandom numbers using quantum protocol BB84 that allows to solve the problem of pseudorandom numbers generation for protocols and algorithms providing information security when using open communication channels.
Keywords: *BB84, pairwise key distribution, Reed – Solomon, codes, error correction.*

Введение

Целями работы являются проведение научного эксперимента с использованием протокола BB84 [1], распределение общего ключа, коррекция ошибок в ключе и создание системы аутентификации между узлами. Коррекция ключа с использованием открытых каналов связи является актуальной проблемой, устройства разнесены между собой, между ними есть квантовый и открытый каналы связи. В работе решается задача коррекции ошибок при передаче по квантовому каналу связи и обеспечена информационная безопасность для открытых каналов связи. Результатом работы является программный комплекс, решающий описанную задачу.

Реализация протокола безопасности открытых каналов связи

Протокол BB84 [2] используется для генерации случайной последовательности для распределения общего ключа. Данная последовательность имеет ряд характеристик, таких как:

– длина (в битах);

– уровень ошибок при передаче кубитов (Quantum Bit Error Rate, QBER).

Известно, что максимально допустимый безопасный QBER примерно равен 15 %. В существующих вариантах протокола BB84 уже реализованы методы, которые позволяют корректировать ошибки, например, алгоритм Cascade в BBM92.

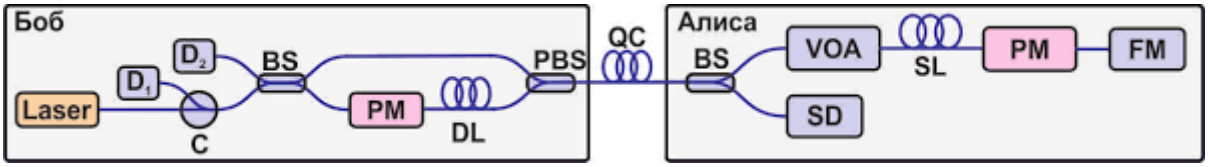


Схема протокола BB84

В протоколе BB84 два участника – Алиса и Боб, которые соединены квантовым каналом. Пример такой схемы показан на рисунке.

При настройке соединения между Алисой и Бобом рекомендуемый параметр QBER равен 5 %. Настройка установки ниже 1 % возможна, но требует идеальных условий. Исходя из полученных результатов, был сделан вывод о необходимости создания программного решения, которое позволит безопасно обнаружить ошибки в квантовом канале связи и использовать их для возможной аутентификации.

В процессе научного эксперимента было реализовано программное решение, которое, используя коды Рида – Соломона [3], корректирует ошибки в последовательности, позволяет выделить ошибочные биты и построить на их основе систему аутентификации.

Для коррекции ошибки используется система кодов Рида – Соломона (n, k), в которой n – длина блока, равняется 35; k – длина сообщения, равняется 11. Количество корректирующих символов равняется 24, что позволяет исправить до 12 ошибок. В ходе проведения экспериментов было установлено, что параметры (35, 11, 25) являются подходящими для решения поставленной задачи.

После подсчета контрольных сумм для бинарных последовательностей Алиса и Боб обмениваются только контрольными суммами.

Разработанное программное решение работает в двух режимах:

1) режим с ведущим и ведомым узлами;

2) режим с равноправными узлами.

Режим с ведущим и ведомым узлами. Режим обусловлен тем, что в системе выбирается ведущий узел, с последовательностью которого будет сравниваться вторая последовательность, и при необходимости корректироваться на ведомых узлах. Достоинством данного режима является скорость работы, и восстановление одинаковой исходной последовательности на всех подключенных узлах без потери длинны ключа.

Режим с равноправными узлами. Все установки в системе подключаются на равных правах. Для коррекции ошибок узлы обмениваются контрольными суммами и убирают из последовательности не совпадающие биты, после чего узлы повторно считаются контрольные суммы и обмениваются ими. При неравенстве контрольных сумм алгоритм повторяется. Достоинством данного режима является то, что все узлы равны, но итоговая последовательность будет короче на число ошибок в ней.

Аутентификация с помощью вектора ошибки

При исправлении ошибок в последовательности, каждый узел определяет, на каких позициях отличается последовательность другого узла. Поскольку программное решение работает с бинарной последовательностью, узел определяет двоичный вектор ошибки. Полученный вектор ошибки запоминается. Для получения ключа второго узла потребуется инвертировать вектор ошибки, а именно – применить логический элемент NOT или заменить нули и единицы на противоположные значения. Далее для аутентификации используется алгоритм ECDSA [4], который позволяет подписывать и верифицировать данные, и протокол ECDH для создания сессионного ключа. Алгоритм ECDSA определяется тремя параметрами:

1) эллиптическая кривая. В данной задаче была выбрана кривая secp256k1 [5];

2) простое число n. Для кривой secp256k1 n равняется 0xFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFEFFFFFC2F;

3) базовая точка G, которая имеет координаты (X, Y), которые для secp256k1 принимают следующие значения:

X = 0x79BE667EF9DCBBAC55A06295CE870B07029BFCDB2DCE28D959F2815B16F81798;

Y = 0x483ADA7726A3C4655DA4FBFC0E1108A8FD17B448A68554199C47D08FFB10D4B8.

В качестве секретного ключа выступает часть вектора ошибки. Вектор ошибки делится

на куски по 256 бит. Случайным образом выбирается один из кусков вектора ошибки и запоминается как секретный ключ (*sk*). Для получения открытого ключа (*pk*) используется формула $pk = sk \times G$.

Подпись сообщений производится в шесть шагов:

1) генерируется псевдослучайное число k;

2) вычисляются координаты $K(X, Y) = k \times G$;

3) вычисляется число $r = X \bmod n$, если $r=0$, то перейти к шагу 1;

4) вычисляется хеш $e = H$ (сообщение);

5) вычисляется подпись $s = k^{-1}(e + sk \times r) \bmod n$, если $s=0$, тогда перейти к шагу 1;

6) передается r, s.

В качестве формата передачи подписи используется DER-формат, который кодируется следующим образом: подпись начинается с 0x30, после чего указывается длинна подписи в байтах, которая принимает значения от 44 до 46. Далее, в зависимости от значения старшего бита чисел r и s, добавляется нулевой байт. То есть если значение этого бита 1, такой байт добавляется, в противном случае – нет. Далее вычисляется длина подписи в байтах, принимающая значения от 20 до 21, и указывается в соответствующем месте DER-формата. Пример подписи ECDSA в формате DER:

304502203b71154ba32b9fb94cdba447b61df-
47132c2cd829275d335523462813acaf-
7fa022100a955b94cdb89bdc3be3db-
c6391027e1579c323e52d-
9820328c2295b63ea5a87c,

где 30 – это обозначение DER-формата; 45 – длина в подписи в байтах; 02 – разделитель r; 20 – длина r в байтах; 3b71154ba32b9fb94cdba 447b61df47132c2cd829275d335523462813acaf7 fa – значение r; 02 – разделитель s; 21 – длина s в байтах; 00a955b94cdb89bdc3be3dbc6391027e 1579c323e52d9820328c2295b63ea5a87c – значение s.

Для протокола ECDH предлагается использовать эллиптическую кривую Curve25519 [6]. В качестве секретного ключа предлагается использовать случайный кусок вектора ошибки, за вычетом 256 бит, которые были использованы для ECDSA. Алиса и Боб выбирают случайно секретный ключ. Для вычисления сессионного ключа Алиса и Боб проходят следующие шаги:

1) вычисление открытого ключа $pk = sk \times G$, где pk – открытый ключ; sk – секретный ключ; G – порождающая точка;

2) Алиса и Боб обмениваются открытыми ключами pk;

3) вычисляется $(X, Y) = sk_A \times pk_B$ для Алисы; $X, Y) = sk_B \times pk_A$ для Боба;

4) точка X является общим секретом.

Узлы вычисляют секретный и открытый ключи для протокола ECDH [8], обмениваются открытыми ключами ECDH с подписью ECDSA [7]. Данный процесс обозначается «рукопожатием». Алгоритм взаимодействия описывается в пять этапов:

1) Алиса и Боб выбирают случайный набор бит из вектора ошибки поделенный на 256 бит для протокола ECDH и алгоритма ECDSA;

2) вычисляют публичные ключи для ECDH и ECDSA;

3) вычисляют хеш публичного ключа ECDH;

4) подписывают алгоритмом ECDSA хеш секретным ключом;

5) обмениваются набором из открытого ключа ECDH, открытого ключа ECDSA, подписью в DER-формате.

Узлы проверяют подписи, используя криптографические примитивы на эллиптических кривых, реализованные алгоритмом ECDSA. Если верификация ключей прошла успешно, то узлы приступают к вычислению сессионного ключа, иначе алгоритм начинается сначала, последовательность удаляется.

Вычисление сессионного ключа происходит при помощи протокола ECDH (п. 3 описания работы протокола ECDH). Поскольку узлы обменялись открытыми ключами на этапе «рукопожатия», то для вычисления сессионного ключа необходимо произвести вычисления, согласно п. 3 описания протокола ECDH на эллиптических кривых. Каждый узел вычисляет сессионный ключ с использованием своего секретного ключа и открытого ключа второго узла. Оба узла получат одинаковые сессионные ключи. Сессионные ключи позволят использовать шифрование для открытого канала связи. Безопасность соединения будет обусловлена тем, что вся информация, которая передается по открытому каналу, будет зашифрована. В качестве алгоритма шифрования предлагается использовать ГОСТ 34.12-2018 «Кузнечик» [9], Advanced Encryption Standard AES-256 [10] или другие симметричные алгоритмы блочного шифрования. Далее узлы используют открытый канал связи для обмена информацией с криптографической защитой.

Заключение

В результате выполнения эксперимента был реализован программный комплекс, который позволяет обрабатывать распределен-

ный ключ, обнаруживать ошибки в ключе, корректировать ошибки и извлекать вектор ошибки, организовывать защищенное соединение по открытым каналам связи, осуществлять обмен информацией с возможностью верификации источника.

Список источников

1. *Bennett C. H., Brassard G.* quantum cryptography: public key distribution and coin tossing // ACM SIGACT news. N. Y.: ACM, ACM SIGACT, 1987. Vol. 18, is. 4. P. 51–53.

2. *Иванова Е. Ю., Ларионцева Е. А.* Введение в квантовую криптографию: основные понятия, подходы и алгоритмы // Инженер. журн.: наука и инновации. 2013. № 11. P. 137–171. URL: http://engjournal.ru/articles/1000/1000.pdf (дата обращения: 28.11.2023).

3. *Мак-Вильямс Ф. Д., Слоэн Н. А.* Теория кодов, исправляющих ошибки. 1979.

4. *Johnson D., Menezes A., Vanstone S.* The elliptic curve digital signature algorithm (ECDSA) // IJIS. 2001. № 1. P. 36–63.

5. *Brown D. R. L.* SEC 2: recommended elliptic curve domain parameters. URL: https://secg.org/sec2-v2.pdf (дата обращения: 03.12.2023).

6. *Langley A., Hamburg M., Turner S.* Elliptic curves for security. URL: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7748 (дата обращения: 03.12.2023).

7. *Liao H. Z., Shen Y. Y.* On the elliptic curve digital signature algorithm. URL: https://web.archive.org/web/20220928092959/http://sci.thu.edu.tw/upload_files/vol_8_06.pdf (дата обращения: 25.11.2023).

8. *Болотов А. А., Гашков С. Б., Фролов А. Б.* Протоколы на эллиптических кривых // Элементарное введение в эллиптическую криптографию. Протоколы криптографии на эллиптических кривых. М.: КомКнига, 2006. С. 83–86.

9. ГОСТ 34.12-2018. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200161708 (дата обращения: 26.11.2023).

10. *Dworkin M.* Advanced encryption standard (AES), Federal Inf. Process. Stds. (NIST FIPS) / National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 2023. Doi: https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.197-upd1.

УДК 004.056.4 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-22-25**

Д. Р. Буслаев*
студент
В. С. Коломойцев*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РЕШЕНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СИСТЕМ ПОИСКА УЯЗВИМОСТЕЙ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ

Исследованы существующие методы поиска уязвимостей веб-приложений. Представлены этапы исследования веб-приложения, а также предлагаются рекомендации по внесению изменений в существующие методы с целью получения большего количества информации об исследуемом приложении и повышения эффективности существующих сканеров. Использование предложенных рекомендаций может помочь специалистам повысить эффективность проектирования защищенных веб-приложений.
Ключевые слова: *уязвимости, получение доступа, радужная таблица, хеш, контроль доступа, поддомены, скрытые директории, метаданные.*

D. R. Buslaev *
Student
V. S. Kolomoitcev*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SOLUTIONS FOR IMPROVING SYSTEMS FOR SEARCHING WEB APPLICATION VULNERABILITIES

The work is devoted to the analysis of existing methods for searching for web application vulnerabilities. The paper presents the stages of researching a web application. The recommendations for making changes to existing methods are offer. It was to obtain more information about the application under study and improve the efficiency of existing scanners. Using the presented recommendations can help to experts grow up to efficiency in designing secure web applications.
Keywords: *vulnerabilities, gaining access, rainbow table, hash, access control, subdomains, hidden directories, metadata.*

Введение

Одним из важнейших этапов процесса обеспечения информационной безопасности информационных систем является выявление уязвимостей, которым они подвержены. Поиск уязвимостей позволяет получить объективную оценку того, насколько легко нарушителю осуществить несанкционированный доступ к информационной системе, а также взглянуть на нее с точки зрения злоумышленника, а именно – понять, каким образом можно скомпрометировать указанную систему и какие несанкционированные действия потенциально может совершить нелегитимный пользователь [1].

Атаки на веб-приложения – один из наиболее популярных методов кибератак. По данным исследования компании *Positive Technologies* за 2020–2021 гг., 17 % от общего числа атак пришлось на эксплуатацию уязвимостей и недостатков защиты веб-приложений, доля веб-приложений, содержащих уязвимости высокой степени риска, составила 66 % в 2020 г., а в 2021 г. – 62 % [1].

На рис. 1 показано распределение самых распространенных уязвимостей, обнаруженных за период 2022–2023 гг. [2]. Кроме представленных уязвимостей, также актуально раскрытие отладочной и конфигурационной информации и межсайтовое внедрение сценариев, которые могут повлечь за собой компрометацию учетных записей пользователей или перенаправление их на поддельные страницы [2].

Наличие подобных уязвимостей в веб-приложении может стать причиной несанкционированного доступа к конфиденциальной информации, модификации или удаления данных, а также несанкционированного досту-

Рис. 1. Распространенные критические уязвимости веб-приложений

па к личному кабинету или функциональности приложения. Таким образом, можно сделать вывод, что обеспечение безопасности веб-приложений является одним из актуальных направлений по защите не только персональных данных пользователей, но и также различных активов компаний.

Методика поиска веб-уязвимостей

Существует большое количество способов поиска веб-уязвимостей [2]. Например, общепринятой методикой для тестирования веб-ресурсов на проникновение считается методика OWASP [2]. Исследование методики OWASP показало, что поиск уязвимостей представляет собой итеративный процесс. Целью каждого этапа является сбор дополнительных сведений об исследуемом объекте, которые могут помочь в дальнейшем анализе. Выбор инструментальных средств для осуществления поиска и эксплуатации уязвимостей, при этом, зависит от имеющегося набора сведений об исследуемой информационной системе [3]. Схематически процесс поиска уязвимостей показан на рис. 2.

Обнаружение и исправление ошибок уязвимостей являются трудоемкой задачей, для успешного решения которой требуется не только повышенная концентрация внимания, но и хорошее знание архитектуры разрабатываемого веб-приложения, характера взаимосвязей его отдельных модулей [3]. Для упрощения поиска были разработаны автоматические сканеры.

Подходы к анализу веб-приложений

Для успешного тестирования веб-приложений необходимо использовать проверенный и систематизированный подход. Большинство систем включает в себя следующие этапы проверки веб-приложения [4]:

1) анализ, включающий в себя:
– сканирование портов;
– сканирование поддоменов;
– поиск скрытого контента (директорий, файлов, информации);
– определение платформы и окружения;
2) возможное искажение параметров и получение доступа:
– уязвимость SQL-инъекции;

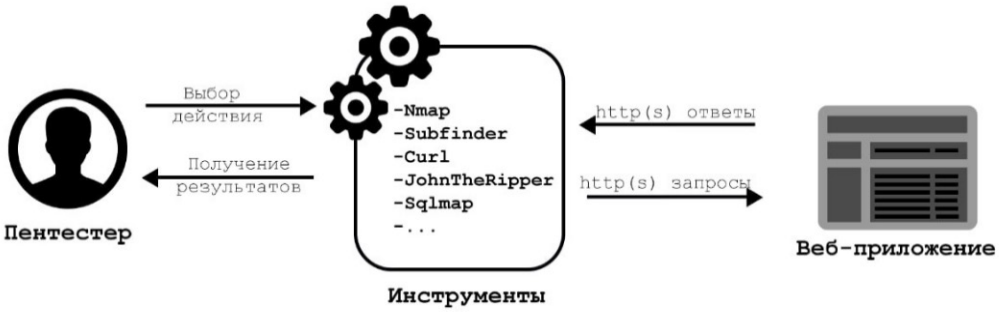


Рис. 2. Схема поиска уязвимостей в веб-приложениях

– поиск уязвимостей, связанных с межсайтовым скриптингом XSS;

– уязвимость внедрения внешних сущностей XML;

– уязвимость инъекции команд операционной системы (ОС);

– уязвимости разграничения доступа к каталогам;

– уязвимость обхода аутентификации;

3) закрепление доступа, включающее в себя:

– нахождение мест хранения паролей и ключей в доступных файлах ОС;

– исследование возможности восстановления паролей из хешей;

– исследование на предмет подбора паролей методом перебора;

– попытки нарушения легитимных механизмов доступа;

– попытки негативного влияния на работу сервисов и программ в ОС.

Остановимся подробнее на этапах, которые являются наиболее подходящими для совершенствования в текущих обстоятельствах работы веб-приложений [2].

Поиск доменных имен заключается в способах подбора (предугадывания) доменных имен организации. В приложении осуществляется перебор доменных имен на DNS-сервисе компании при помощи использования словарей или правил мутации [4]. Заранее подготавливается большой список слов и возможных поддоменов и опрашивается DNS-сервис. Учитывая, что метод исследования напрямую зависит от использованных словарей или правил мутации, то использование на веб-ресурсе нестандартных (уникальных) доменных имен позволяет усложнить работу злоумышленнику. Таким образом, расширение словаря и использование в нем не только часто используемых поддоменов, но и редких, позволяет проанализировать веб-приложения на предмет наличия небезопасных и доступных имен поддоменов (в том числе не всегда очевидных) и, дать информацию администратору безопасности, что необходимо внести правки в указанном элементе системы.

Поиск скрытых директорий также осуществляется с помощью заранее подготовленного словаря. В классических сканерах подставляется название директории из словаря в URL и, в случае получения успешного кода, делается вывод о наличии данной директории. В скрытых директориях нередко хранятся исходные коды приложения, учетные записи пользователей, документы и другие данные, которые могут помочь злоумышленнику нарушить целостность веб-приложения. Таким образом, нахождение таких директорий сканером позволяет уведомить о наличии уязвимости и вовремя предпринять необходимые меры.

На данном этапе возможным способом совершенствования подхода может стать добавление поиска метаданных документов, которые будут находиться в приложении. Этот шаг может оказаться желательным, так как по этим данным можно получить информацию о пользователях, которые создали эти документы, директории, в которых были созданы документы, программное обеспечение и, в некоторых случаях, даже данные от учетных записей пользователей. Исходя из полученной в результате анализа информации, администратор безопасности сможет улучшить процесс хранения документов, чтобы снизить вероятность того, что злоумышленник сможет воспользоваться информацией, содержавшейся в них.

После проведения этапа анализа приложения чаще всего совершается попытка получения контроля доступа несанкционированным пользователем. Уязвимости аутентификации могут быть реализованы с помощью получения данных пользователей или с помощью нахождения ошибок в программном коде. Вход в учетные записи пользователей осуществляется с помощью заранее найденных параметров авторизации или bruteforce-атаки по словарю из популярных паролей пользователей. Не все системы могут расшифровать найденные логин и пароль, поэтому в случае нахождения хешированных учетных записей злоумышленником может быть проведен перебор по заранее подготовленным радужным таблицам. Радужные таблицы – массив данных, содержащий заранее посчитанные хеш-функции для определенного количества распространенных паролей. Таким образом, необходимо генерировать уникальные (редкие) хеши, чтобы в случае добычи злоумышленником хешей паролей у него не было возможности быстро проверить их и использовать для взлома системы [5]. Исходя из этого, программа должна провести поиск по базе данных, перебрав множество заготовленных хешей, сопоставив их с имеющимися, и выявить, какие из них небезопасны (для создания рекомендации для последующей их замены).

Рассмотрим подробнее, как происходит поиск XSS- и XXE- уязвимостей. Недостатки программ для детектирования данных типов уязвимостей связаны с особенностями архитектуры веб-приложений. Многие веб-приложения предусматривают авторизацию на веб-ресурсе для увеличения привилегий пользователя. Та-

ким образом, авторизованным пользователям будет доступен больший функционал веб-приложения, чем неавторизованным. В существующих решениях (например, Acunetix Online Web Security Scanner и др.) поиск осуществляется только в не требующих авторизации областях веб-приложения. Это является существенным недостатком, так как уязвимости могут находиться в недоступной для поиска части веб-ресурса [6].

Исходя из этого, при разработке программы, позволяющей эффективно реализовывать поиск XSS- и XXE-уязвимостей, необходимо, чтобы сотрудник компании осуществлял локальный санкционированный доступ на веб-ресурс и, уже после этого, искать XSS- и XXE-уязвимости. Необходимость в этом, не в последнюю очередь, обуславливается тем, что в некоторых областях веб-приложения могут быть части, где есть потенциальная возможность загрузки файлов (например, многоуровневые комментарии), чем, вероятно, может воспользоваться злоумышленник. Таким образом, своевременная осведомленность о наличие такого рода уязвимостей, может помочь в скорейшем их устранении.

В результате предложенных рекомендаций для совершенствования систем по поиску веб-уязвимостей, на этапе анализа, значительно увеличиться осведомленность администратора безопасности о наличие в веб-приложении каких-либо уязвимостей. В свою очередь, на этапе получения доступа и работы с искаженными параметрами доступа, может повысится эффективность за счет более глубокой проверки различных частей веб-ресурса, так как будет учитываться фактор работы в системе легитимного пользователя, с более широким набором привилегий.

Заключение

В работе проведено исследование сканеров веб-уязвимостей, выявлены их недостатки и приведены рекомендации по их устранению. К таковым рекомендациям относятся дополнительный поиск метаданных документов, расширение словарей для поиска поддоменов и скрытых директорий с помощью добавления в них уникальных слов. Кроме того, понимание принципа работы радужных таблиц, в случае нахождения несложных хешей, может повысить осведомленность администратора безопасности в вопросе безопасности использованных паролей и алгоритмов хеширования. Работа сканера в привилегированном режиме (авторизированном) на веб-ресурсе может позволить находить большее количество потенциальных уязвимостей, так как будет использоваться больший функционал приложения.

Список источников

1. Уязвимости и угрозы веб-приложений. URL: https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/web-vulnerabilities-2020-2021/ (дата обращения: 27.11.2023).

2. *Дроздова Е. А., Каменко Е. И.* Безопасность веб-приложений: анализ уязвимостей и средства их предотвращения в эпоху растущей онлайн-угрозы // Традиции и инновации в современной психологии и педагогике: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (4 нояб. 2023 г.). Уфа: Аэтерна, 2023. С. 130–131.

3. *Выборнова О. Н., Рыжиков А. Н.* Автоматизированный поиск уязвимостей веб-приложения на основе машинного обучения с подкреплением // Управление и высокие технологии. 2021. № 1. С. 1–7.

4. Современные методы исследования безопасности веб-приложений: инструментарий. URL: https://habr.com/ru/companies/owasp/articles/336074/ (дата обращения: 03.12.2023).

5. Радужная таблица. URL: https://encyclopedia.kaspersky.ru/glossary/rainbow-table/ (дата обращения: 03.12.2023).

6. *Носиров З. А., Ажмухамедов И. М.* Обнаружение XSS-уязвимостей на основе анализа полной карты веб-приложения // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 1. С. 1–17.

УДК 004.056.53 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-26-30**

М. В. Вдовин*
студент
В. А. Рындюк*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АКТУАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ SIEM-СИСТЕМ

Рассмотрены подходы к построению систем управления событиями и информацией о безопасности с учетом современных тенденций анализа уязвимостей. Проблема рассмотрена в приложении к изучению дисциплины «Основы информационной безопасности» для бакалавров направления 10.03.01 – «Информационная безопасность».
Ключевые слова: *система защиты информации, мониторинг, средства защиты информации.*

M. V. Vdovin*
Student
V. A. Ryndyuk*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

CONTEMPORARY SOLUTIONS IN THE FIELD OF SIEM SYSTEMS

Approaches to constructing event and security information management systems have been examined, taking into account contemporary trends in vulnerability analysis. The issue has been addressed in the context of studying the discipline "Fundamentals of Information Security" for Bachelor's degree students in the field of 10.03.01 "Information Security".
Keywords: *information security system, monitoring, information security tools.*

Введение

В настоящие дни объем информации, создаваемой и обрабатываемой во всем мире, растет с огромной скоростью. По данным анализа международной исследовательской и консалтинговой компании *International Data Corporation* (*IDC*), прогнозируется, что общая сумма генерируемых данных за год во всем мире вырастет до 175 зеттабайт к 2025 г. С одной стороны, такое резкое увеличение открывает все больше возможностей для обучения, развития, инноваций и коммуникаций между людьми. С другой – с увеличением объемов информации возрастают уровень угроз и количество инцидентов информационной безопасности. Только за первую половину 2023 г. количество утечек информации в мире выросло в 2,4 раза, количество скомпрометированных записей персональных данных в мире составило 18,3 млрд. В России количество утечек только записей персональных данных составило 705 млн, что на 72 % больше, чем в первом полугодии 2022 г. [1].

Увеличение количества угроз информационной безопасности ставит перед специалистами по защите информации задачи, требующие комплексного подхода. В ответ на растущие риски организации стремятся к разработке эффективных средств, способных обеспечить не только защиту от известных угроз, но оперативную реакцию на новые виды атак. Одним из инструментов, позволяющих решить проблему мониторинга и управления безопасностью корпоративных систем, стала система управления информацией и событиями в области информационной безопасности (ИБ), называемая SIEM-системой (Security Information and Event Management, SIEM).

Данное исследование проводится с целью анализа существующих актуальных решений в области SIEM-систем и сравнения их характеристик.

Понятие и сущность SIEM-системы

Понятие SIEM включает в себя две составляющие: SIM (Security Information Management) –

управление информационной безопасностью и SEM (Security Event Management) – управление событиями безопасности.

Сегмент SIM отвечает за анализ и управление историческими данными, что позволяет выявить шаблоны и тенденции в угрозах, а также обеспечивает соответствие требованиям нормативных актов и законодательства, касающегося хранения и аудита данных.

Сегмент SEM, напротив, фокусируется на немедленном обнаружении и реагировании на текущие события и инциденты безопасности. Данный сегмент обрабатывает данные в реальном времени и сосредотачивается на выявлении аномалий и потенциальных угроз в непрерывной оперативной среде.

Для успешной работы SIEM-система должна реализовывать методы сбора, обработки и анализа событий безопасности, оценки уровня защищенности информационных ресурсов, обнаружение в реальном времени и анализ исторических инцидентов безопасности, анализ и управление информационными рисками, создание отчетной документации.

Данный функционал позволяет решить проблему, связанную с недостаточной способностью различных средств защиты информации взаимодействовать и обмениваться информацией об угрозах, уязвимостях, нарушителях и инцидентах.

Архитектура SIEM-системы

Стоит заметить, что для эффективной работы SIEM-системы требуется, чтобы в организации уже были внедрены различные средства защиты, образующие комплексную защищаемую инфраструктуру, и созданы политики информационной безопасности, которые определяют, как в пределах организации и ее информационно-телекоммуникационной инфраструктуры управлять, защищать и распределять активы, в том числе критическую информацию [2].

В архитектуру SIEM-системы чаще всего входят три составляющих: агенты (межсетевые экраны, антивирусные программы, системы обнаружения вторжений), которые выполняют сбор событий безопасности; хранилище данных, которое накапливает в себе первоначально обработанные и отфильтрованные данные от агентов с целью последующего анализа; и сервер приложений, который является ядром данной системы и выполняет основные функции мониторинга. Исходя из этого, мы имеем три уровня работы с событиями ИБ: сбор данных, управление данными и их анализ.

На первом уровне происходит сбор информации от различных источников, в роли которых могут выступать межсетевые экраны, антивирусные программы, системы обнаружения вторжения, журналы событий баз данных и рабочих станций [3]. Здесь происходит первичная обработка и фильтрация информации, что необходимо для снижения нагрузки на сервер приложений.

На втором уровне реализуется управление данными, которое заключается в накапливании событий в репозитории и последующей выдаче по запросу анализатора.

На третьем уровне происходит основная деятельность по обработке и анализу всех событий, с последующим формированием отчета о текущем положении безопасности.

Функциональность SIEM-системы

Каждый уровень подразумевает набор определенных функций. К базовым относятся такие функции, как нормализация, фильтрация, классификация, агрегация, корреляция, приоритезация, анализ событий, инцидентов и их последствий, генерация отчетов и предупреждений, принятие решений и визуализация данных. Кроме того, к современным решениям класса SIEM предъявляются дополнительные требования в виде оценки защищенности ресурсов информационной системы, проверки соответствия системы управления информационной безопасности существующим требованиям и нормам, а также управления рисками ИБ.

Стоит отметить, что переход к механизмам более высокого уровня модели осуществляется с уменьшением обрабатываемых событий, но, в то же время, сложность их обработки увеличивается. Исходя из этого, можно выделить пять основных функциональных подсистем [4]: сбор данных, предварительная обработка, хранение, анализ и представление.

Обзор актуальных SIEM-систем

Проанализируем наиболее известные SIEM-системы. На данный момент мировой рынок SIEM-систем занимает небольшое количество игроков, которые закрывают потребности большей части клиентов. По данным ежегодного анализа *Gartner* [5], лидирующие позиции занимают производители *Microsoft*, *IBM* и *Splunk*, претендентами стали такие компании, как *Rapid7* и *Logrhythm*, провидцами новых тенденций стали *Micro Focus* и *Sumo Logic*, а нишевыми игроками – *LogPoint* и *Huawei* [6].

Сравнительная характеристика отечественных SIEM-систем

Критерии оценки/вендор	*MaxPatrol SIEM*	«КОМРАД»	«СерчИнформ SIEM»	*RuSIEM*	*Security Capsule SIEM*
Целевой сегмент	Все секторы, любой размер бизнеса	Крупный и средний бизнес. Банковский, государственный секторы	Малый, крупный и средний бизнес. Все секторы	Государственный сектор, любой размер бизнеса	Крупный, средний бизнес, малый бизнес. Государственный сектор
Сроки внедрения с заданными характеристиками	От 1 месяца	От 1 месяца	От 6 часов до 8 дней	До 2–3 недель	От 1 месяца
Крупнейший из известных внедрений в России	ГК «Росатом»	ВС РФ	«НефтеТрансСервис»	ГБУ СО «Сахалинский областной центр информатизации»	Предприятия энергетического комплекса (группы Интер РАО)
Сертификаты ФСТЭК России	№ 3734 от 12.04.2017	№ 3498 от 13.01.2016	№ 3498 от 13.01.2016	№ 4402 от 12.05.2021	№ 6493 от 09.11.2016
Наличие в реестре отечественного программного обеспечения	Регистрационный номер в реестре: 1143	Регистрационный номер в реестре: 239	Регистрационный номер в реестре: 4711	Регистрационный номер в реестре: 3808	Свидетельство № 1139 от 14 июня 2016 г.
Сектор экономики, в которых выполнены внедрения	Финансы, госсектор, энергетика, промышленность, связь, торговля	Госсектор, коммерческий сектор, банки, SOC-центры	Госсектор и оборона, IT, топливно-энергетический комплекс (ТЭК), здравоохранение, пищевая промышленность, строительство, сельское хозяйство, соц. сфера, торговля, транспорт, услуги, финансовый сектор	Госсектор, промышленность, коммерческий сектор, процессинг, банки, интернет-коммерция, реклама	ТЭК, госсектор, территориальный Фонд обязательного медицинского страхования, предприятия госкорпораций «Газпром», «Роснефть», «Росграница»
Карточка инцидента	19 полей	12 полей	Более 50 полей	372 поля, настраиваемые пользователем	8 полей
Оповещение об инциденте	SMTP, скрипты	SMTP, скрипты	Email	SMTP	SMS, e-mail, syslog
Принятие решений в рамках процесса обработки инцидентов	Ручное	Ручное	Автоматическое	Ручное	Нет
Авторегистрация уязвимостей	Работы со сторонними сканерами	Нет	Нет	Интеграция с некоторыми сканерами через API, файловые логи и syslog	Обработка информации из файла отчетов сканера
Настройка собственной модели определения критичности уязвимости	CVSS- уязвимости плюс критичность актива в формате CVSS 2.0	Нет	Нет	Да	Нет
Возможность выделения ложных срабатываний	В ручном режиме	В ручном режиме	Нет	В ручном режиме	Да
Определение критичности актива	CVSS, с учетом интеграции со сканерами	Нет	Нет	Нет	Да

Окончание таблицы

Критерии оценки/вендор	*MaxPatrol SIEM*	«КОМРАД»	«СерчИнформ SIEM»	*RuSIEM*	*Security Capsule SIEM*
Наличие предустановленных правил корреляции	Более 150	20	Более 250	Более 270	118
Наличие предустановленных отчетов	Более 40	10	Более 250	Более 50	5
Операционная система в основе решения	Windows, Debian	Debian	Windows	Ubuntu x64	Главный модуль, коррелятор, агрегатор, анализатор: *Microsoft*. Сборщики: *Microsoft*, *FreeBSD*
Система управления базами данных (СУБД)	Elasticsearch	Своя NoSQL (основа – LevelDB)	MongoDB	Elasticsearch, RuSIEM DB, postgresql, ClickHouse, neo4j	В базовой поставке PostgreSQL. Microsoft SQL Server 2012, MySQL, Firebird, MongoDB
Средняя степень сжатия при хранении нормализованных событий	До 7	Нет	Нет	Нет	Нет
Ограничение по количеству обрабатываемых событий в секунду	15kEPS 30kEPS	Лимитированы только аппаратными ограничениями	Не имеет программного ограничения EPS – может быть ограничено аппаратной конфигурацией используемого оборудования	ArcSight Connector способен обрабатывать до 90 тысяч EPS событий, Event Broker – 300 млрд событий на один узел, без лимита в распределенной инсталляции	3000
Агрегация событий по типу	Да	Да	Да	Нет	Да
Нормализация событий	Да	Да	Да	Да	Да
Корреляция по историческим данным	нет	Нет	Да	Нет	Да
Количество поддерживаемых источников событий	200+ (по уточнению вендора)	70+	20+ профилей и возможность подключения более 300 источников	63 уникальные модели, 300+ разновидностей и версий	6000+
Использование технологий искусственного интеллекта	Да	Нет	Нет	DL, ML на базе RuSIEM Analitics	Нет
Использование алгоритмов машинного обучения	Да	Нет	Нет	PMML, AI, DL	Нет
Срок существования системы, лет	3+	6	5	4	12

На отечественном рынке [7] наиболее популярными стали *MaxPatrol SIEM*, «КОМРАД», «СерчИнформ SIEM», *RuSIEM* и *Security Capsule*. Сравнение описанных SIEM-систем приведено в таблице.

Сравнивая характеристики приведенных SIEM-систем, нельзя однозначно ответить, какая из компаний предоставляет лучший продукт, потому что каждая система подходит под определенные требования заказчика.

Так, для малого и среднего предприятия лучше выбрать «СерчИнформ SIEM» из-за быстроты внедрения и отсутствия потребности в установке дополнительных модулей. Для крупных предприятий лучше использовать *MaxPatrol*, «КОМРАД», *RuSIEM* и *Security Capsule SIEM*.

Если требуются решения для предприятия, связанного с оборонной промышленностью, то лучше применять «КОМРАД», который является поставщиком для Вооруженных сил Российской Федерации. Для финансовых сфер можно выбрать *MaxPatrol SIEM*, а для медицинских – *Security Capsule SIEM*, так как целевая аудитория данных решений находится именно в этих сферах.

Если рассматривать системы с точки зрения зрелости, то самыми опытными продуктами в этой сфере стали *Security Capsule SIEM*, «КОМРАД» и «СерчИнформ». Относительно новыми выступают *MaxPatrol SIEM* и *RuSIEM*.

Заключение

Анализ российского рынка SIEM-решений показал, что специалисты, в первую очередь, ориентируются на постоянно обновляемые правила для обнаружения актуальных угроз, на возможность реагировать на события ИБ прямо из SIEM, а также на удобство интерфейса для операторов системы и аналитиков ИБ.

Более половины респондентов обращают внимание на гибкость архитектуры SIEM-системы. Более 40 % интересуются возможностью быстрого старта, а также применением поведенческой аналитики, искусственного интеллекта и машинного обучения.

В ходе внедрения SIEM почти все организации ожидают своевременного обнаружения инцидентов, ведущих к недопустимым событиям нарушения ИБ, а также получения актуальной экспертизы для эффективной защиты своей инфраструктуры.

В целом на мировом рынке наблюдается развитие данной сферы защиты информации в область SIEM как сервиса (SIEMaaS), который предоставляет полную картину информационной безопасности компании.

Таким образом, в данной работе были рассмотрены общие аспекты функционирования SIEM-системы и проанализированы современные отечественные решения, к которым относятся *MaxPatrol SIEM*, «КОМРАД», «СерчИнформ SIEM», *RuSIEM* и *Security Capsule*. Для каждой представленной SIEM-системы были отмечены области наилучшего использования.

Список источников

1. InfoWatch. Утечки информации ограниченного доступа в мире и России, первое полугодие 2023 г. URL: https://www.infowatch.ru/sites/default/files/analytics/files/utechki-informatsii-ogranichennogo-dostupa-v-mire-i-rossii-za-pervoe-polugodie-2023-goda.pdf (дата обращения: 02.10.2023).

2. ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 13335-3. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Ч. 3: Методы менеджмента безопасности информационных технологий. URL: https://www.altell.ru/legislation/standards/13335-3.pdf (дата обращения: 15.11.2023).

3. The exabeam security management platform. URL: https:// www.exabeam.com/product/ (дата обращения: 16.11.2023).

4. *Беззатеев С. В., Фомичева С. Г.* SIEM-системы в управлении информационной безопасностью: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2021. 131 с.

5. Gartner. Security information and event management (SIEM) review and ratings. URL: https://www.gartner.com/reviews/market/security-information-event-management (дата обращения: 20.11. 2023).

6. LogRhythm. Magic quadrant for SIEM. URL: https://logrhythm.com/gartner-magic-quadrant-siem-report-2022/ (дата обращения: 20.11.2023).

7. Positive technologies. Исследование TAdviser и positive technologies: рынок SIEM России. URL: https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/siem-market-in-of-russia/ (дата обращения: 01.12.2023).

УДК 004.056.55 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-31-33**

И. С. Величко*
аспирант
С. В. Беззатеев*
доктор технических наук, доцент
А. В. Афанасьева*
старший преподаватель
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ПРОТОКОЛ ГЕНЕРАЦИИ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА VRF

VRF, или проверяемая случайная функция, – одно из наиболее успешных решений для генерации случайных чисел в области безопасности смарт-контрактов. Сегодняшние централизованные решения, основанные на этом алгоритме, не полностью прозрачны для участников, что вызывает проблемы безопасности. Рассмотрена классическая система, ее уязвимости, и предложен расширенный протокол для поддержания функций безопасности генерации псевдослучайных чисел для доверительных систем.
Ключевые слова: *VRF, блокчейн, разделение секрета, псевдослучайность.*

I. S. Velichko*
PhD Student
S. V. Bezzateev*
Dr. Sc., Tech., Associate Professor
A. V. Afanasieva*
Senior Lecturer
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DISTRIBUTED PSEUDORANDOM GENERATION PROTOCOL BASED ON VRF ALGORITHM

VRF, or verifiable random function, is one of the most successful randomness generation solutions in smart contract security field. Today's centralized solutions based on this algorithm are not fully transparent for participants which rises security issues. In this paper, we review the classic system, its vulnerabilities, and propose an extended protocol to maintain the security features of pseudorandom number generation for trustless systems.
Keywords: *VRF, blockchain, secret sharing, pseudorandomness.*

Введение

Скоротечное развитие блокчейн-систем приводит к появлению новых угроз безопасности. Растущая популярность технологии приводит к повышению активности хакеров и высокой концентрации кибератак на данный технологический сектор. Особенно уязвимой частью блокчейн-систем являются смарт-контракты.

Смарт-контракты – цифровые алгоритмы, предназначенные для автоматического выполнения и документирования событий в соответствии с запрограммированными условиями и соглашениями, исключая предоставление услуг третьей стороны.

Самой распространенной областью использования смарт-контрактов является сфера финансов. Наиболее актуальными на сегодняшний день считаются следующие области:

– торговля цифровыми финансовыми активами с юридической передачей прав собственности;

– предоставление кредитных услуг;

– системы краудфандингового сбора средств;

– осуществление контроля передвижения товаров;

– осуществление контроля сделок на рынке недвижимости;

Несмотря на большие усилия разработчиков по уменьшению влияния человеческого фактора на программную составляющую смарт-контрактов, на сегодняшний день остается острая проблема – небезопасные источники случайности (согласно открытому ре-

естру классификации уязвимостей смарт-контрактов SWC-120 [1]), ведь часто используемые «псевдослучайные» хеш блока и идентификатор транзакции ненадежны и достаточно предсказуемы.

Случайные числа могут применяться как и в малозначимых проектах азартных игр, так и в сложных криптографических алгоритмах с нулевым разглашением (прим. zkSNARK).

Алгоритм VRF

Существует большое количество алгоритмов, используемых в защищенных системах генерации случайных значений. Одним из наиболее эффективных является VRF [2] – Verifiable Random Function, или «функция проверяемой случайности». VRF позволяет создавать псевдослучайные числа, привлекая к генерации стороннего участника вне цепочки. Этот участник является обладателем секрета, необходимого для создания псевдослучайного числа. Чтобы предотвратить манипулирование результатами узлом вне цепочки, пользователь протокола передает алгоритму некоторое псевдослучайное начальное значение. Подразумевается, что любой ответ (результат) узла вне цепочки может быть проверен на достоверность (что алгоритм генерации был выполнен в соответствии с общеизвестной схемой).

Недостатки VRF-протоколов. VRF имеет небольшой, но очень значимый недостаток: он подвержен атаке посредством MEV (максимальное извлекаемое значение, Maximal Extractable Value).

Справочная информация: «MEV» – термин, используемый больше в экономической сфере, описывает способность майнера изменять последовательность выполняемых транзакций в блоке для выполнения различных видов арбитражных операций. Эта функция также имеет чисто техническое применение, а именно – возможность влиять на значение хэша путем перестановки транзакций (в PoS возможность перестановки подписей в разделе тела блока).

VRF-алгоритмы принимают на вход «случайное значение» – хеш блока. Любая MEV-атака предполагает изменение последовательности транзакций в создаваемом блоке (прим. Ethereum, и большая часть сетей используют буфер mempool [3], что позволяет производить избирательные выборки транзакций), любое изменение последовательности транзакций (в алгоритмах Poof of Stake изменение порядка в массиве подписей) приводит к изменению хеша блока. Получается, что любого вида сговор, подразумевающий единение держателя секретного ключа и MEV block-builder, может приводить к возможности подлога.

Если нет способа предотвратить подделку начального входного значения, то необходимо найти способ сокрытия секрета для VRF-генератора. Описанная выше проблема приводит к необходимости создания системы хранения, в которой значение секретного ключа хранится не явно, а в виде отдельных проекций, совместно используемых участниками.

Решение проблемы централизации

Решение вышеописанной проблемы достигается введением в систему алгоритмов разделения секрета без участия дилера, или DKG (Distributed Key Generation) [4], а также алгоритмов верифицируемого разделения ключа VSS (Verifiable Secret Sharing) [5].

По сравнению с предыдущей версией системы, эта вносит изменения в алгоритм генерации псевдослучайности путем создания протокола на основе готовой блокчейн-сети.

Моделируемая сеть использует набор PoA-узлов в силу их большей мобильности и распространенности. На стороне генератора PoA-узлы участвуют в создании псевдослучайных чисел. Каждый узел имеет право «подать заявку на участие». Количество участников ограничено. Каждый PoA участвует в раунде обмена секретными проекциями, генерируя индивидуальные секретные ключи (SSK) и общий ключ PK. Принятие решения группой валидаторов PoA происходит в соответствии с заранее определенным пороговым значением в системе. Все взаимодействие узлов PoA осуществляется посредством обмена информацией по контракту с контроллером DVRF (смарт-контракт на стороне внешней блокчейн-сети).

Список источников

1. Регистр уязвимостей смарт-контрактов. URL: https://swcregistry.io/docs/SWC-120 (дата обращения: 15.04.2023).

2. *Micali S., Rabin M., Vadhan S.* Verifiable random functions // 40th annual IEEE symposium on foundations of computer science. 1999. October. P. 120–130.

3. Ethereum yellowpaper. URL: https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf (дата обращения: 15.04.2023).

4. Towards scalable threshold cryptosystems / A. Tomescu, R. Chen, Y. Zheng, I. Abraham // 2020 IEEE

symposium on security and privacy. 2020. May. P. 877–893.

5. *Pedersen T. P.* Non-interactive and information-theoretic secure verifiable secret sharing // Advances in cryptology – CRYPTO'91: Lecture notes in computer science. 1992. Vol. 576. P. 129–140.

6. *Shamir A.* How to share a secret // Communications of the ACM. 1979. P. 612–613.

УДК 004.056.52 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-34-37**

Г. А. Грузденков*
студент
В. С. Коломойцев*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МЕТОДЫ БЕЗОПАСНОГО РАЗГРАНИЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ЧАСТИЧНОГО ДОСТУПА

Работа посвящена исследованию методов разграничения информации в системах частичного доступа на предмет возможности их совмещения с целью повышения безопасности информационных систем. Представлены краткое описание систем частичного доступа, методов разграничения информации между пользователями, а также возможные комбинации методов с выявлением наиболее эффективной практики. Использование определенных модификаций одного метода другими потенциально может позволить повысить защищенность всей информационной системы частичного доступа.
Ключевые слова: *методы разграничения доступа к информации, системы частичного доступа, защита информации, средства защиты информации, информационная безопасность.*

G. A. Gruzdenkov*
Student
V. S. Kolomoitcev*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

METHODS FOR SECURE INFORMATION DELIMITATION IN PARTIAL ACCESS SYSTEMS

The paper is devoted to analyzing the methods of information delimitation in partial access systems for the possibility of combining them in order to improve the security of information systems. The paper presents a brief description of partial access systems, methods of information delimitation between users, as well as possible combinations of methods with the identification of the most effective practices. The use of certain modifications of one method by other methods will potentially increase the security of the entire partial access information system.
Keywords: *methods of differentiating access to information, partial access systems, information protection, information protection means, information security.*

Введение

Неизменной составляющей современных информационных систем является все возрастающее число пользователей, работающих с ними. Подобная тенденция может оказать негативный эффект на безопасность информационных систем, ввиду возрастающей неопределенности во многих аспектах деятельности пользователей. Одним из методов противодействия этой неопределенности может служить внедрение в информационные системы механизмов разграничения полномочий пользователей на доступ к информации [1].

Подобные решения, имеющиеся в системах частичного доступа к информации, состоят в основном из множества отдельных методов разграничения информации [2]. Рассмотрим работу систем частичного доступа подробнее, с целью выявления возможностей для повышения уровня безопасности, обеспечиваемого ими.

Понятие системы частичного доступа

Сегодня практически любая информационная система в той или иной мере оснащена механизмами защиты информации [1]. Системы частичного доступа выделяются среди прочих систем, обеспечивающих безопасность информации, ввиду их широкой распространенности и частоты применения в том или ином виде [2]. При этом возникает необходимость ограничения части информации от посторонних лиц и, что не менее важно, от некоторых лиц, непо-

средственно взаимодействующих с информационной системой [2].

Ключевая особенность систем частичного доступа состоит в предоставлении ограниченного доступа к информации или функциональности системы [2]. Различают несколько методов разграничения доступа, которые могут существенно отличаться друг от друга.

Методы разграничения доступа

Имеются четыре основных метода разграничения доступа к информации [4]. Среди них находятся такие методы, как:

1) разграничение при помощи списков (Role-based Access Control, RBAC);

2) разграничение при помощи матрицы доступа (Discretionary Access Control, DAC);

3) разграничение информации при помощи мандата (Mandatory Access Control, MAC);

4) разграничение при помощи паролей (Password-Based Authentication, PBA);

5) разграничение на основе атрибутов доступа (Attribute-based Access Control, ABAC).

Метод разграничения при помощи списков (RBAC) состоит в создании групп пользователей с последующим назначением прав доступа к определенным ресурсам. Разрешения могут быть выданы на доступ как к определенным файлам и директориям, так и к целым функциям системы. Наиболее широкое применение такой метод находит в операционных системах и базах данных [4].

Метод разграничения при помощи матрицы доступа (DAC) подразумевает использование таблицы полномочий, где строки являются идентификаторами субъектов доступа, а столбцы представляют объекты доступа [4]. В качестве субъектов выступают пользователи, в то же время объектами являются информационные ресурсы системы. Стоит отметить, что существуют методы оптимизации работы с таблицами полномочий, однако они зачастую требуют высокой степени статичности данных в таблице, в связи с долгим временем их обработки для дальнейшего удобного поиска [5]. Метод разграничения информации по категориям (MAC) заключается в отнесении информации к определенной категории, с последующим закреплением пользователей за этой категорией. Допуск к информации предоставляется на основании «максимального» уровня допуска у пользователя среди всех возможных категорий.

Разграничение на основе атрибутов доступа (ABAC) в общем виде представляет собой создание фильтров доступа на основании выбора различных атрибутов на уровне ресурсов системы.

Наконец, метод парольного разграничения представляет собой устоявшеюся практику получения информации посредством ввода ключевого слова (пароля). За каждым блоком ресурсов закреплен пароль для доступа, пользователи получают пароли и, в конечном итоге, взаимодействуют с компонентами системы в соответствии с разметкой ресурсов.

Возможные комбинации методов разграничения доступа

Каждый из методов, рассмотренных ранее, обладает как своими преимуществами, так и недостатками. Однако использование методов в комплексе может существенно повысить их эффективность, а также защищенность системы частичного доступа [7, 8]. Так, метод парольного разграничения может отлично использоваться совместно с любым другим методом, но в то же время методы доступа по списку (RBAC) и мандатам (MAC) будут, в основном, избыточны, так как будет происходить своего рода дублирование друг друга.

Особого внимания заслуживает метод, основанный на атрибутах доступа (ABAC). Использование метода может привести к существенному повышению уровня защищенности, если применять его в комплексе с методами MAC и парольного разграничения.

Рассмотрим возможную модификацию методов MAC и ABAC следующим образом:

1) масштабируем MAC, на уровень отдельного ресурса (файла);

2) введем в ABAC обязательное использование атрибута мандата пользователя, описанного в MAC;

3) составим иерархическую модель организации с указанием уровней доступа.

Рассмотрим ресурсы информационной системы как отдельные файлы. Множество файлов (в том числе документы) хранят в себе внутреннюю разметку, системную информацию и т. п. [9]. Эту информацию можно использовать для разграничения внутренней информации файла при помощи внедрения в него дополнительной разметки [9]. Также важно отметить, что дополнительная разметка должна быть применена с учетом мандатного разделения, описанного в MAC.

Далее обозначим условие на обязательное использование мандата пользователя из MAC в качестве атрибута ABAC. Таким образом, при проверке уровня доступа будут учитываться не

только уже готовые (универсальные) фильтры, но и дополнительный критерий, необходимый для организации работы с ресурсом на уровне содержания файла (ресурса).

Наконец, требуется сформировать иерархическую модель доступа организации. На основании модели будет возможно строгое разделение содержания ресурса между пользователями. Критерии разделения могут быть различны, в зависимости от целей и условий обработки ресурсов в системе.

Рассмотрим пример работы предлагаемого решения. Допустим, организация обрабатывает документы, в которых содержится информация различной степени конфиденциальности (причем в одном документе). Сначала составим иерархическую модель на основании допусков пользователей к работе с конфиденциальной информацией. Далее назначим пользователям мандаты при помощи модели ABAC, т. е. внесем в нее дополнительный атрибут. В качестве заключительного шага сформируем разметку документа в зависимости от степени ее конфиденциальности. Один из примеров реализации этого – в документах docx-формата, где все содержание хранится в виде файлов *.xml и которые легко поддаются модификации дополнительной информацией [9]. В итоге получается система, где пользователи, имеющие более «низкий» мандат, не смогут взаимодействовать с информацией, доступной при наличии более «высокого» мандата.

Таким образом, предлагаемое решение, путем внедрения областей разметки внутрь самого документа, позволяет удобно и быстро формировать документ необходимого уровня безопасности, с точки зрения защиты от несанкционированного доступа. Использование таких подходов к разграничению доступа ABAC и MAC позволяет усилить лучшие их стороны. Также, при необходимости, информацию более высокого уровня защищенности можно дополнительно защищать паролем на уровне MAC. К недостатку метода можно отнести увеличение объема итогового документа. Так, при возрастании числа областей разметки закономерно будет увеличиваться объем основного документа, хранящего в себе всю информацию о разметке.

Заключение

В статье приведено описание систем частичного доступа и их ключевой составляющей. Также описаны возможные комбинации рассматриваемых методов. Среди них наибольший интерес представляют соединения методов разграничения ABAC и MAC. Предложен подход к организации иерархического разграничения, через введение иерархической модели организации, модификацию ABAC и MAC. Использованием подхода можно добиться повышенного уровня защищенности, например, конфиденциальной информации. Однако недостатками будут служить необходимость модификации существующих практик и увеличение объема конечного (защищаемого) ресурса.

Список источников

1. *Королев А. Н., Плешакова О. В.* Комментарий к Федеральному закону от 27 июля 2006г. № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации»: постатейный. М. Юстицинформ, 2007. 125 с. (Биб-ка журн. «Право и экономика». Комментарий специалиста). EDN: QXFHKN.

2. *Семериков В. Н.* Стандарты и ограничение доступа к информации // Стандарты и качество. 2014. № 9. С. 50–55. – EDN: SVMVNT.

3. Что такое частичный доступ и как он работает // PSK group. URL: https://psk-group.su/znacheniya/cto-takoe-casticnyi-dostup-i-kak-on-rabotaet (дата обращения: 07.12.2023).

4. Методы разграничения доступа // informationsecurityweb. URL: https://informationsecurityweb.wordpress.com/2016/05/30/методы-разграничение-доступа (дата обращения: 07.12.2023)

5. *Щеглов К. А., Щеглов А. Ю.* Метод контроля доступа к файлам на основе их ручной и автоматической разметки // Известия высш. учеб. завед. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 7. С. 41–45. EDN: SGTJCP.

6. *Ходырев С. В.* Обеспечение безопасности персональных данных при помощи систем система управления информационной безопасностью // Проблемы управления речными бассейнами при освоении Сибири и Арктики в контексте глобального изменения климата планеты в XXI веке: сб. докл. XIX Междунар. науч.-практ. конф. (Тюмень, 17 марта 2017 г). Т. II. Тюмень: Тюмен. индустриал. ун-т, 2017. С. 264–268. EDN: YYWTQD.

7. *Токарев А. А.* Системы защиты информации как основа информационной безопасности, и методы повышения эффективности функционирования данных систем // Территория науки. 2012. № 3. С. 63–67. EDN: UCSHJB.

8. *Кулиева Р. Г., Сташков Д. В.* К вопросу о методах защиты информации и средствах контроля эффективности защиты информации в автоматизированных системах /// Информационная безопасность – актуальная проблема современности. Совер-

шенствование образовательных технологий подготовки специалистов в области информационной безопасности. 2020. № 2-1 (13). С. 62–65. EDN: QLJAKT.

9. *Коломойцев В. С., Грузденков Г. А.* Метод многоуровневого доступа к документам в системах электронного документооборота // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: сб. ст. XXV Междунар. науч. конф.: в 3 ч. (СПб., 30 мая 2022 г.). Ч. 3. СПб.: ГУАП, 2022. С. 44–49. EDN: PBHMKS.

УДК 621.391 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-38-42**

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

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ВЫБОРУ ВИДА ВЕЙВЛЕТА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ВЕКТОРОВ ПРИЗНАКОВ ИЗ КРАТНОМАСШТАБНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ

Представлены результаты по обоснованию выбора вида вейвлетов для синтеза на их основе кратномасштабных распределений кадров видеоизображений, используемых для формирования векторов признаков. Рассмотрена система распознавания, базирующаяся на различиях контрастности векторов признаков. Исследована зависимость контрастности вектора признаков от типа материнского вейвлета. Предложены алгоритмы формирования векторов признаков из кратномасштабных распределений обрабатываемых изображений. Обоснованы предложения по повышению чувствительности векторов. Представлены результаты эксперимента, подтверждающие правомерность теоретических выводов.
Ключевые слова: *вектор признаков, распознавание видеоизображений, контрастность векторов признаков, вейвлет-преобразование, кратномасштабные представления.*

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 are presented to justify the choice of the type of wavelets for the synthesis on their basis of multiple-scale distributions of video image frames used to generate feature vectors. A recognition system based on differences in the contrast of feature vectors is considered. The dependence of the contrast of the feature vector on the type of maternal wavelet has been studied. Algorithms for generating feature vectors from multiple-scale distributions of processed images are proposed. Suggestions for increasing the sensitivity of vectors are substantiated. Experimental results are presented that confirm the validity of the theoretical conclusions.
Keywords: *feature vector, video image recognition, contrast of feature vectors, wavelet transform, multiple-scale representations.*

Введение

Автоматические системы распознавания находят самое широкое применение в различных сферах деятельности человека, начиная от охранных систем, реагирующих на резкую смену контролируемого ландшафта, и заканчивая идентификацией жителей мегаполисов, основанной на учете тонкой структуры индивидуальных признаков [1–4].

Очевидно, что различная степень идентификации предполагает использование различного методического аппарата формирования признаков распознавания [5, 6]. И если в охранных системах достаточно использовать бинарный классификатор [7], учитывающие минимальные различия в окружающей панораме, вызванные вмешательством постороннего объекта, то системы идентификации, как правило, строятся на основе технологий искусственного интеллекта [8, 9].

Однако в любом случае эффективность системы распознавания определяется контрастностью формируемого признакового простран-

ства [10, 11]. С учетом указанных обстоятельств, в настоящей работе представлены результаты исследования по обоснованию структуры векторов признаков, формируемых на основе матриц вейвлет-преобразований обрабатываемых видеокадров.

Обоснование выбора алгоритма распознавания

Для проведения эксперимента была выбрана система автоматического распознавания мест возникновения лесных пожаров по результатам обработки кадров видеоизображений. Обоснованность такой системы определяется необходимостью мониторинга громадных площадей лесных массивов. Такая система распознавания реализует алгоритм последовательного сравнения кадров, поступающих с видеосистемы [12], размещенной, например, на летно-подъемной платформе.

Формализация изображений каждого кадра осуществляется посредством формирования вектора гистограмм градации яркости, на основе которых строятся векторы признаков. Это позволяет сам алгоритм распознавания свести к реализации процедур сравнению разности векторов признаков текущего и предыдущего кадров с эмпирически установленным порогом:

$$|\mathbf{R}_{1m} - \mathbf{R}_{0m}| \rightarrow \begin{cases} < D_{\text{доп}} \rightarrow H_0 \\ \geq D_{\text{доп}} \rightarrow H_1 \end{cases}. \qquad (1)$$

где $\mathbf{R}_{1m}$ и $\mathbf{R}_{0m}$ – векторы признаков текущего и предыдущего кадра местности; $m = 1, \ldots, M$ – величина размерности формируемых векторов признаков; $D_{\text{доп}}$ – допустимый порог различия изображений кадров, вызванного наличием возгорания лесного массива; H_0 и H_1 – соответственно гипотезы наличия и отсутствия пожара та текущем кадре видеоизображения.

Удобство такого алгоритма обусловлено простотой его реализации.

Очевидно, что эффективность его работы будет определяться уровнем контрастности векторов признаков при наличии возгораний и пожаров, запечатленных на обрабатываемом кадре видео изображений.

Поскольку вектор признаков формируется посредством кратномасштабной обработки кадров видеоизображений [13, 14], то целью исследования явился выбор подхода к формированию вектора признаков.

Предложения по формированию векторов признаков

В ходе эксперимента в качестве исходного был определен кадр изображения с лесным пожаром (рис. 1).

Для кратномасштабного преобразования был определен следующий алгоритм, реализованный в среде MathCAD [15]:

$$W_{k,n} = \begin{vmatrix} \text{for } k \in 0 \ldots K \\ \quad \text{for } n \in 0 \ldots T \\ \quad\quad W_{k,n} \leftarrow \dfrac{1}{\sqrt{k+1}} \sum_{k=0}^{K} \left[H_m \psi \left(\dfrac{m-n}{k+1} \right) \right] \\ W \leftarrow W \end{vmatrix}, \qquad (2)$$

где k – текущая переменная масштабирования изображения; K – число уровней масштаба; n – текущая переменная сдвига; T – протяженность интервала сдвига; H_m – обрабатываемая гистограмма градации яркости изображения; ψ – исходный материнский вейвлет.

На рис. 2 показана гистограмма градации яркости изображения рис. 1.

Рис. 1. Обрабатываемый кадр изображения

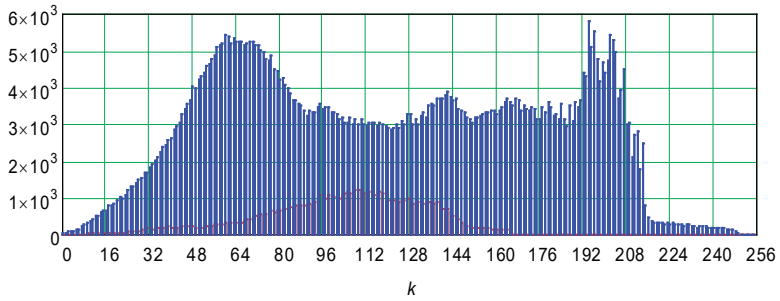


Рис. 2. Гистограмма градации яркости изображения

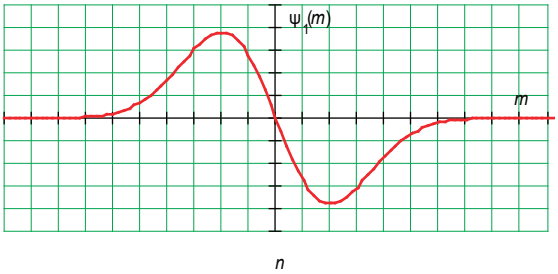


Рис. 3. Временное представление вейвлета Гаусса первого порядка

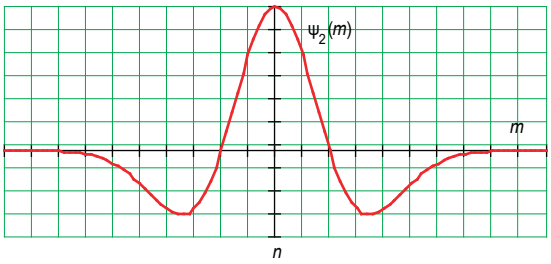


Рис. 4. Временное представление вейвлета Гаусса второго порядка

В ходе исследования рассматривались два типа вейвлета Гаусса первого порядка ψ_1 и второго порядка ψ_2 [5, 16].

Временное представление вейвлетов изображено на рис. 3; 4.

Очевидно, что различие вида вейвлетов приведет к различиям синтезируемых в соответствии с алгоритмом (2) матриц вейвлет-преобразований (рис. 5; 6).

Поскольку матрицы вейвлет-преобразований $W1$ и $W2$ являются двухразмерными, то, соответственно, можно формировать два типа вектора признаков. Первый тип вектора признаков будет иметь размерность формирующих фильтров, т. е. равный числу уровней масштабирования k, а размерность второго типа вектора признаков будет определяться интервалом формируемых сдвигов n. Для формирования вектора признаков первого типа использовался следующий алгоритм:

$$ {}^1R_k = \begin{vmatrix} \text{for } k \in 0 \ldots K \\ \quad \text{for } n \in 0 \ldots T \\ \quad\quad R_k \leftarrow \dfrac{1}{\sqrt{k+1}} \sum\limits_{k=0}^{K} \left[H_m \psi \left(\dfrac{m-n}{k+1} \right) \right]; \\ R \end{vmatrix} \quad (3) $$

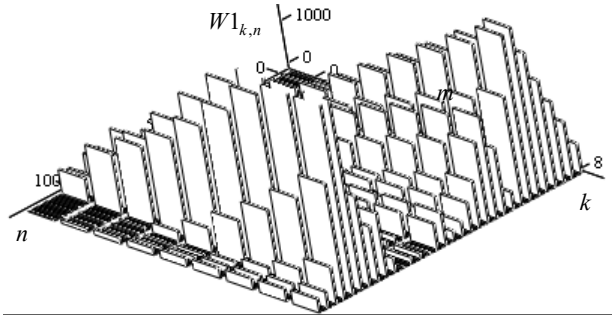


Рис. 5. Матрица изображения, полученная на основе вейвлета Гаусса первого порядка

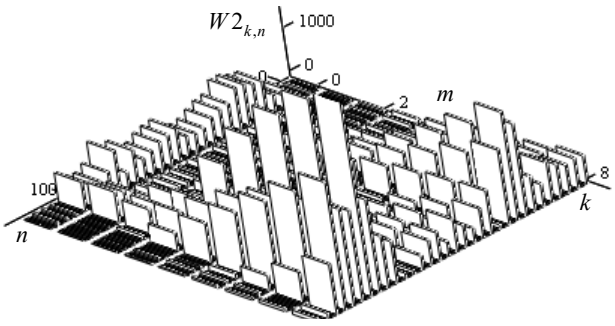


Рис. 6. Матрица изображения, полученная на основе вейвлета Гаусса второго порядка

а для формирования вектора признаков второго типа использовался алгоритм:

$$
{}^2R_n = \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \ldots K \\ \quad \text{for } n \in 0 \ldots T \\ \quad\quad R_n \leftarrow \dfrac{1}{\sqrt{k+1}} \sum\limits_{k=0}^{K} \left[H_m \psi \left(\dfrac{m-n}{k+1} \right) \right]. \\ R \end{array} \right. \qquad (4)
$$

На рис. 7–10, соответственно, показаны векторы признаков ${}^1R_k$ и ${}^2R_n$.

Результаты эксперимента позволяют заключить, что вектор признаков первого типа не обеспечивает высокую контрастность, поскольку усреднение в пределах каждого уровня масштабирования ведет к нивелированию структурных особенностей матриц вейвлет-преобразований. И хотя применение вейвлета Гаусса первого порядка дает возможность получить высокую энергетическую мощность вектора признаков, получаемые различия между соседними уровнями масштаба весьма незначительны. Поэтому сложно надеяться на высокую чувствительность такого вектора признаков к структурным изменениям изображений. Вместе с тем векторы признаков второго типа характеризуются высокой динамикой изменения значений между соседними элементами. К тому же высокая разрядность такого вектора позволяет надеяться на его высокую чувствительность к изменениям характера изображения. Поэтому предлагается в качестве векторов признаков, формируемых на основе вейвлет-преобразований, использовать векторы, получаемые путем усреднения матрицы кратномасштабного преобразования гистограммы яркости изображений в направлении сдвигов, на основе алгоритма (4).

А окончательный выбор типа материнского вейвлета был определен по результатам оценки значения контрастности в соответствии с выражением:

$$
| R_{1m} - R_{0m} | = D. \qquad (5)
$$

Для оценки контрастности использовалось 200 кадров, на которых изображение пожара занимало не 25 % общей площади. Затем кадры делились пополам, и для каждой из частей формировалось свое вейвлет-распределение.

В качестве примера представлен кадр изображения на рис. 1, поделенный пополам (согласно белому пунктиру). И левая половина кадра использовалась для формирования вектора

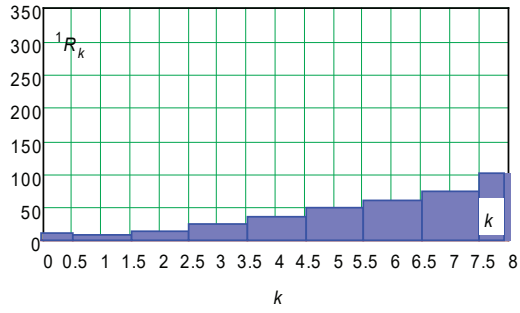


Рис. 7. Вектор признаков первого типа на основе вейвлета Гаусса второго порядка

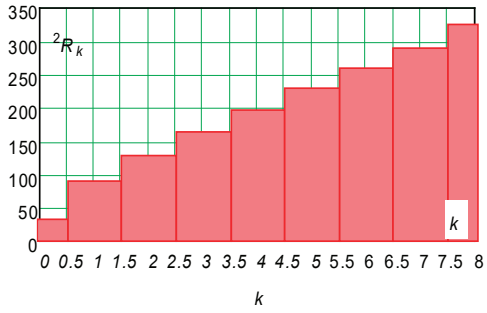


Рис. 8. Вектор признаков первого типа на основе вейвлета Гаусса первого порядка

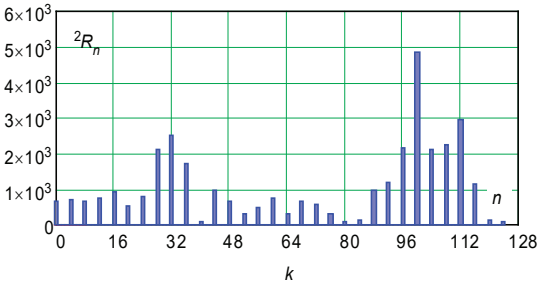


Рис. 9. Вектор признаков второго типа на основе вейвлета Гаусса второго порядка

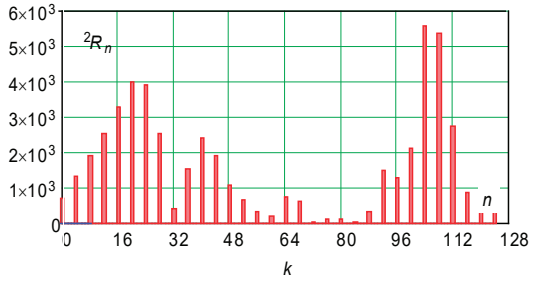


Рис. 10. Вектор признаков второго типа на основе вейвлета Гаусса первого порядка

R_{1m}, а правая – для R_{0m}. Контрастность оценивалась для каждого типа вейвлета.

В результате контрастность векторов признаков на основе вейвлетов Гаусса первого рода оказалась на 15 % выше, что и определило его выбор.

Выводы

1. Полученные результаты исследования показали целесообразность выбора для синтеза вейвлет-преобразований функции Гаусса первого рода, так как ее применение обеспечивает более высокую контрастность формируемых векторов признаков.

2. При этом сами векторы признаков целесообразно формировать путем усреднения матриц кратномасштабного преобразования в направлении параметров сдвига.

3. Дальнейшие исследования будут связаны с выбором размерности формируемой матрицы, в зависимости от размеров кадра видеоизображения, а также способов повышения контрастности вейвлет-преобразований, предложенных в [17].

Список источников

1. *Nikoghosyan K. H., Harutyunyan E. A., Galstyan D. M.* Improving the image-to-speech system accuracy through integration of optical character recognition and language processing techniques // Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. Information technologies, electronics, radio engineering. 2023. № 1. P. 44–50.

2. Design of an intelligent medication system based on face recognition / B. He, R. Wang, M. Sui, K. Liu // Вестн. Тихоокеан. гос. ун-та. 2023. № 2 (69). P. 63–70.

3. *Дворников С. В., Дворников С. С., Коноплев М. А.* Алгоритм распознавания сигналов радиосвязи на основе симметрических матриц // Информ. технологии. 2010. № 9. С. 75–77.

4. *Шабуров А. С.* Разработка систем распознавания таргетированных компьютерных атак на информационные системы с использованием нейросетевых технологий // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2018. № 7. С. 49–54.

5. Формирование векторов признаков сигналов из вейвлет-коэффициентов их фреймовых преобразований / С. В. Дворников, Д. В. Степынин, А. С. Дворников, А. П. Букарева // Информ. технологии. 2013. № 5. С. 46–49.

6. *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.

7. *Данилов В. В., Бабичева М. В.* Автоматизированная система видеонаблюдения по распознаванию предметов повышенной опасности // Сборник науч. тр. Донец. ин-та железнодорож. транспорта. 2020. № 56. С. 20–26.

8. *Дубнов Ю. А.* Метод отбора признаков на основе вероятностного подхода и перекрестной энтропии на примере задачи распознавания изображений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2020. № 2. С. 78–85.

9. *Царькова Е. Г.* Применение искусственных нейронных сетей для обработки информации в системах видеонаблюдения на охраняемых объектах УИС // Безопасность. Управление. Искусственный интеллект. 2022. Т. 2, № 2 (2). С. 19–26.

10. Распознавание сигналов на основе вероятностной оценки дисперсии векторов их признаков / С. В. Дворников, М. А. Сиверс, А. С. Дворников, С. С. Дворников // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2020. № 3. С. 81–90.

11. Моделирование обнаружения, сопровождения и распознавания объекта на сложном фоне оптическим информационным средством / Р. А. Гудаев, Д. А. Рогов, А. В. Цапцов, М. С. Смирнов // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2021. № 3. С. 55–65.

12. *Богданов А. В., Полунин Г. А., Козлова Ю. С.* Определение площади, контролируемой видеокамерами системы раннего обнаружения пожара // Сибир. пожар.-спасат. вестн. 2022. № 4 (27). С. 20–25.

13. Способ сжатия графических файлов методами вейвлет-преобразований / А. А. Умбиталиев, С. В. Дворников, И. Н. Оков, А. А. Устинов // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2015. № 3. С. 100–106.

14. *Дворников С. В., Дворников С. С., Устинов А. А.* Корреляционные свойства коэффициентов кратномасштабного преобразования типовых изображений // Информатика и автоматизация. 2022. Т. 21, № 5. С. 983–1015.

15. *Дворников С. В., Сауков А. М.* Метод распознавания радиосигналов на основе вейвлет-пакетов // Науч. приборостроение. 2004. Т. 14, № 1. С. 85–93.

16. *Горбачев В. Н., Казаков А. Я., Савельева М. Ю.* Вейвлет-преобразование полутонового изображения в конечном поле // Оптический журн. 2021. Т. 88, № 2. С. 40–49.

17. *Дворников С. В., Сауков А. М.* Модификация частотно-временных описаний нестационарных процессов на основе показательных и степенных функций // Науч. приборостроение. 2004. Т. 14, № 3. С. 76–85.

18. *Лихачев А. В.* Новый алгоритм повышения контраста мелкомасштабных деталей изображения на основе разложения по вейвлетам // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 3. С. 44–48.

УДК 004.9.62.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-43-46**

В. Г. Ерышов*
кандидат технических наук, доцент
О. Д. Гайдук*
студент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПРИЗНАКОВЫХ ВЕКТОРОВ ПРИ ВИРУСНОМ АНАЛИЗЕ НА БАЗЕ АБСТРАКТНОГО СИНТАКСИЧЕСКОГО ДЕРЕВА

Для эффективного применения интеллектуальных бинарных классификаторов формулируется задача формирования релевантного признакового пространства для JS-разновидности текстовых вирусных скриптов. Анализируются существующие методы извлечения признаков из вредоносных файлов, а также приводятся результаты решения данной задачи с помощью абстрактного синтаксического дерева.
Ключевые слова: *текстовые вирусы, вектор признаков, абстрактное синтаксическое дерево, вирусный анализ.*

V. G. Eryshov*
PhD, Tech., Associate Professor
O. D. Gayduk*
Student
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

EXTRACTION OF FEATURE VECTORS IN VIRUS ANALYSIS BASED ON AN ABSTRACT SYNTACTIC TREE

For the effective use of intelligent binary classifiers, the problem of forming a relevant feature space for JS-a type of text virus scripts is formulated, existing methods of extracting features from malicious files are analyzed, and the results of solving this problem using an abstract syntax tree are presented.
Keywords: *text viruses, feature vector, abstract syntax tree, virus analysis.*

Введение

В современном мире с ростом всеобъемлющего использования IT-технологий и развитием веб-приложений тотально возрастают угрозы применения вирусных атак. Эксплуатация вирусного программного обеспечения (ВПО) способна нанести серьезный ущерб не только частным лицам, но и крупной компании, неся за собой крупномасштабный финансовый и репутационный ущерб.

Внедрение инструментов автоматизации и интеллектуализации в современных текстовых и табличных редакторах актуализирует проблему мониторинга скриптов на наличие в них вредоносных составляющих. В настоящее время скриптовые текстовые трояны выделены в отдельную категорию вирусов [1–4]. Бывает достаточно сложно определить, какие скрипты являются вредоносными, а какие нет, без применения моделей машинного обучения (ML-моделей). Традиционно подобная задача формулируется как задача выявления аномалий, для решения которой используют методы бинарной классификации.

В данной работе для эффективного применения интеллектуальных бинарных классификаторов формулируется задача формирования релевантного признакового пространства для JS-разновидности текстовых троянов, анализируются существующие методы извлечения признаков из вредоносных файлов, а также приводятся результаты решения данной задачи с помощью абстрактного синтаксического дерева (Abstract Syntax Tree, AST).

Существующие методы извлечения признаков из вредоносных файлов

Проблема выявления признаков вирусной модификации программного обеспечения, к которому в полной мере относятся скрипты, написанные на интерпретируемых программных языках, возникла достаточно давно, но продол-

жает быть остро актуальной в силу высокой вариабельности текстовых вирусов. Стоит отметить, что существует множество работ на тему вирусной аналитики и бинарной классификации вирусов [1, 5–7]. В частности, авторы в статье [6] использовали модель Word2vec для извлечения характерных признаков из бинарных файлов, на основе дизассемблерного листинга, с последующим ранжированием признаков сверточной нейронной сетью. В статье [7] упоминается TF-IDF (term frequency, TF; inverse document frequency, IDF) как один из основных методов NLP. Данный метод предназначен для снижения числа наименее значимых векторов в выборке данных и тем самым избавляет их от лишнего шума. Существуют также работы, в которых для детектирования вирусов применялся модель FastText [8]. В отличие от Word2vec, модель FastText способна сформировать вектор признаков для слов, не встречающихся в обучающей выборке. Эффективны в задачах вирусной аналитики бинарные классификаторы, такие как DecisionTree и Random Forest [3]. Также стоит отметить работы, в которых довольно уверенно себя показывает метод опорных векторов SVM [3, 7–9], а также алгоритм AdaBoost [1, 4].

Кратко опишем основные концептуальные идеи приведенных выше методов и моделей.

TF-IDF – метод, основанный на вычислении статистической меры, используемой для оценки важности слова в контексте документа, являющегося частью коллекции документов. Вес некоторого слова пропорционален частоте употребления этого слова в документе и обратно пропорционален частоте употребления слова во всех документах коллекции.

Обозначим $|D|$ – число документов в коллекции, а $\left|\{d_i \in D \mid t \in d_i\}\right| = N$ – число документов из коллекции D, в которых встречается слово t (когда частота встречаемости слова t не равна нулю, $n_t \neq 0$). Тогда мера TF_IDF соответствует выражению (1):

$$\mathrm{TF\_IDF}(t,d,D) = \frac{n_t}{\sum_i n_i} \cdot \log \frac{|D|}{\left|\{d_i \in D \mid t \in d_i\}\right|}. \quad (1)$$

Модель Word2vec, так же, как и TF-IDF, принимает на вход большую коллекцию текстов, но на выходе сопоставляет каждому слову из коллекции вектор признаков. В ходе обучения Word2vec максимизирует косинусную меру близости (Similarity) между векторами слов A и B, которые вычисляются в подобных контекстах, и минимизирует косинусную меру между словами, которые не встречаются, в соответствии с выражением (2):

$$\mathrm{Similarity} = \frac{\sum_{i=1}^{N|D|} A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N|D|} (A_i)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{N|D|} (B_i)^2}}. \quad (2)$$

Модель FastText реализует один из способов векторного представления слов с помощью N-грамм символов. Алгоритм проходит по скользящим окном по коллекции текстов, но рассматривает не слова как таковые, а их символьные N-граммы. Например, 3-граммами слова «яблоко» являются «ябл», «бло», «лок», «око». FastText использует hashing trick, вычисляя и используя при подсчетах хеши N-грамм, что существенно ускоряет вычисления.

Метод AST схож с FastText в отношении использования N-грамм. Однако в данном случае N-граммы строятся на основе признаков, полученных из абстрактного синтаксического дерева. Основная идея здесь заключается в том, что теперь при обучении классификатора в тренировочных данных не учитываются строки наподобие названий переменных, функций, классов или ссылок внутри кода, а непосредственно выделяются его синтаксические конструкции и порядок их выполнения. Это необходимо при анализе программных текстов, поскольку после создания стандартной байтовой сигнатуры злоумышленник без труда может заменить наименования переменных в коде, но переписать саму структуру скрипта и изменить его синтаксическое дерево гораздо сложнее. В частности, вирусным аналитикам не рекомендуется делать стандартные сигнатуры по ссылкам или названиям переменных как раз из-за вышеперечисленных проблем, возможной неустойчивости и низкого охвата сигнатурой потенциальных угроз.

Результаты интеллектуального выявления признакового пространства в ходе вирусного анализа

Серия наших экспериментов проводилась над коллекциями программных текстов с использованием открытых датасетов ресурса VirusTotal и Dr.Web, которые разделяют коллекции по типам JS, VBS, PS1, BAT, PY. На рисунке показана столбчатая диаграмма, где каждый столбец соответствует количеству идентификаторов компрометации соответствующего типа текстовых вирусов, и отражает данные

антивирусной лаборатории Dr.Web с января по сентябрь (включительно) 2023 г.

Из рисунка видно, что абсолютное большинство скриптов, написанных на языке Visual Basic (VBS) и присылаемых на анализ в антивирусную лабораторию, являются вирусными. Это также подтверждается недавним официальным заявлением компании *Microsoft* [https://learn.microsoft.com/en-us/windows/whats-new/deprecated-features] о том, что ею планируется прекращение поддержки VBS. Свой выбор компания объясняет желанием защитить конечных пользователей своих продуктов, указывая на потенциальную вредоносность и устарелость данного языка программирования. Поэтому рассмотрение Visual Basic более не является актуальным.

Анализу скриптов PowerShell (PS1) посвящена работа [9], описывающая практики детектирования вредоносных скриптов данного семейства методами машинного обучения. Но для данных скриптов оказалось крайне сложным найти открытую чистую выборку файлов.

Скрипты JavaScript (JS) похожи по синтаксису и способам применения на VBS. Здесь стоит отметить, что VBS, как и JS, также можно встретить внутри страниц браузера, но, как правило, данные скрипты на VBS всегда являются вирусными. Следовательно, изучение JavaScript и его детектирование являются актуальными задачами.

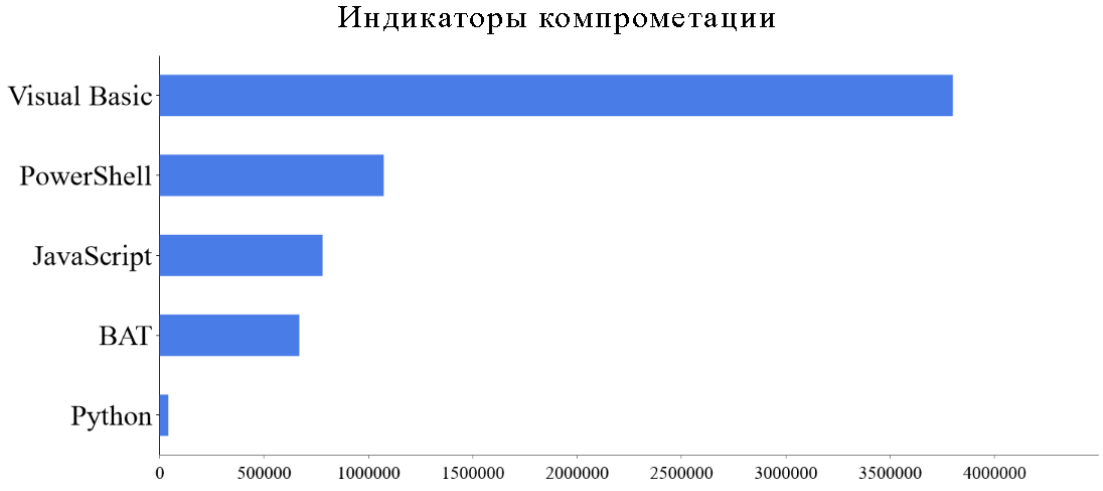
Итоговая обучающая выборка состоит из двух классов файлов, написанных на JavaScript, вирусных и чистых. Файлы преимущество собирались с портала VirusTotal, а также локального хранилища DrWeb. Чистые файлы также брались из открытых репозиториев с чистым исходным кодом, фреймворков и библиотек. Среди вирусных файлов содержатся все категории вирусов, такие как JS.Stealer, JS.BackDoor, JS.DownLoader, JS.Packed, JS.Redirector и JS.Iframe (классификация вирусов приведена в соответствии с правилами классификации антивируса «Доктор Веб»).

Всего при формировании датасета нами было собрано 80 тысяч файлов (40 тысяч вирусных и столько же чистых файлов). Классы были сбалансированы путем искусственного уменьшения количества чистых файлов до количества вирусных. Размер тестовой выборки был выбран равным 20 % от общего числа файлов.

Для уменьшения количества занимаемой физической и оперативной памяти для нового набора данных было принято решение заменить текстовые названия синтаксических конструкций, получаемых на основе парсера, на числовые идентификаторы. Для выполнения этой цели был реализован обычный словарь.

Эксперименты проводились с использованием языка программирования Python и библиотеки Sklearn. Эксперименты были проведены для метода извлечения признаков AST+n-граммы.

Перед обучением все буквы из текстов внутри файлов приводились к нижнему регистру для уменьшения шума при обучении. Для обучения AST использовалось линейное ядро, так как оно показало свою эффективность в нескольких работах [7–10]. Параметр регуляризации был равен 0,01. Все замеры времени про-



Количество идентификаторов компрометации для текстовых вирусов в период с января по сентябрь включительно 2023 г.

Результаты обучения признаков на основе AST+5-граммы на разных классификаторах

	Классификатор	Accuracy	F1-Score	Recall	Precision	Время обучения (сек)
AST+5-граммы	Random Forest	0,73	0,79	0,99	0,65	11
	Decision Tree	**0,99**	**0,99**	**1,00**	**0,99**	**179**
	AdaBoost	0,99	0,99	0,99	0,99	1484
	SVM	0,99	0,99	0,99	0,99	1549

водились с использованием библиотеки Python «time». При обучении последовательно использовались четыре классификатора – Random Forest, Decision Tree, Ada Boost и SVM. Для Random Forest максимальная глубина была задана равной 2. Для Decision Tree использовались значения, предоставляемые в sklearn по умолчанию. В AdaBoost параметр estimators был установлен в 100.

Результаты обучения признаков AST на разных классификаторах представлены в таблице. Для признаков AST использовались 5-граммы.

Для обучения модели на 80 тысячах файлов суммарно потребовалось порядка 80 ГБ оперативной памяти. На создание массива токенов на основе метода «word_tokenize» ушло 3349 с ≈ 56 мин.

Особо следует отметить, что AST+n-граммы весьма компактны (занимают на жестком диске чуть более 1 ГБ), не требуя при этом модели для хранения и показывая при этом более высокие показатели времени и точности на таких классификаторах как Decision Tree, AdaBoost и SVM. Среди классификаторов по скорости обучения уверенно выходит вперед Random Forest. На всех рассмотренных методах извлечения признаков и довольно большом объеме данных, время его обучения не превышало 11 с. Классификатор Decision Tree продемонстрировал отличные значения качества выявления признакового пространства практически для всех базовых метрик. Это дает основания для эффективной его реализации в практических целях.

Заключение

В статье сформулирована задача формирования релевантного признакового пространства для JS-разновидности текстовых троянов, проанализированы существующие методы извлечения признаков из вредоносных файлов, а также приведены результаты решения данной задачи с помощью абстрактного синтаксического дерева AST. Оценка результатов проведенных экспериментов которых показала, что отличные значения качества выявления признакового пространства практически для всех базовых метрик показал классификатор Decision Tree.

Список источников

1. Detection of obfuscated malicious JavaScript code. Future Internet. 2022. URL: https://ideas.repec.org/a/gam/jftint/v14y2022i8p217-d869370.html (дата обращения: 20.10.2023).

2. *Фомичева С. Г.* Теория потоковых систем защиты информации: монография. Норильск, 2007. 243 с.

3. *Фомичева С. Г.* Влияние ранжирования индикаторов атак на качество моделей машинного обучения в агентных системах непрерывной аутентификации // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 8. С. 45–55.

4. Malware detection using machine learning / A. Kumar [et al.] // KGSWC 2020. CCIS. 2020. Vol. 1232. P. 61–71.

5. Malware detection using machine learning and deep learning / H. Rathore, S. Agarwal, S. K. Sahay, M. Sewak // BDA 2018. LNCS. 2018. Vol. 11297. P. 402–411.

6. Categorizing malware via a Word2Vec-based temporal convolutional network scheme / J. Sun [et al.] // J. cloud comput. 2020. Vol. 9, № 1. P. 53.

7. *Mamoru M., Ryo I.* Applying NLP techniques to malware detection in a practical environment // International journal of information security. 2022. Vol. 21, № 2. Doi: 10.1007/s10207-021-00553-8.

8. *Luming F., Yanpeng C., Jianwei H.* Detection and classification of malware based on FastText. 2020. Doi: 10.1109/ICAIIS49377.2020.9194806.

9. *Danny H., Shay K., Amir R.* AMSI-based detection of malicious PowerShell Code using contextual embeddings. 2020. Doi: 10.1145/3320269.3384742.

10. *Bezzateev S. V., Fomicheva S. G., Zhemelev G. A.* Agent-based zerologon vulnerability detection // 2021 wave electronics and its application in information and telecommunication systems. WECONF – 2021 – conference proceedings. 2021. P. 9470548.

УДК 004.056.53 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-47-49**

К. А. Жиданов*
старший преподаватель
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ КРОССЧЕЙН-ОПЕРАЦИЙ

Рассмотрены известные взломы кроссчейн-мостов, приведены примеры эксплуатации уязвимостей. Приведена общая схема работы кроссчейн-мостов. Приведена классификация способов взлома. Сделаны выводы относительно текущего состояния безопасности кроссчейн-мостов.
Ключевые слова: *блокчейн, кроссчейн, мосты.*

K. A. Zhidanov*
Senior Lecturer
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

PROBLEMS OF ENSURING THE SECURITY OF CROSS-CHAIN OPERATIONS

This paper examines known hacks of cross-chain bridges and provides examples of exploitation of vulnerabilities. A general diagram of the operation of cross-chain bridges is given. A classification of hack methods is given. Conclusions are drawn regarding the current state of security of cross-chain bridges.
Keywords: *blockchain, cross-chain, bridges.*

Введение

Кроссчейн-мосты являются инфраструктурой, которая позволяет передавать активы и выполнять операции между различными блокчейнами. Они обеспечивают связь и совместимость между разными блокчейнами.

Актуальность проблемы уязвимостей кроссчейн-мостов продиктована их все более широким использованием в блокчейн-индустрии (объем средств, заблокированных на мостах составляет около $ 14 млрд). С ростом популярности децентрализованных финансовых приложений (DeFi) и развитием экосистемы блокчейнов, кроссчейн-мосты становятся важным инструментом для передачи цифровых активов между различными блокчейнами. Однако, в силу сложности технологии и недостаточного испытания на прочность, кроссчейн-мосты подвержены различным уязвимостям, которые могут привести к краже значительных средств.

Объемы похищенных средств с использованием уязвимостей кроссчейн-мостов становятся все более значительными. Так, за 2022–2023 гг. сумма похищенных с мостов средств превысила $ 2 млрд.

Наиболее крупные подвергшиеся атаке мосты

1. Сеть Ronin – взлом на 600 млн долларов.

Сеть Ronin – это сайдчейн на базе Ethereum, который в основном используется для игры в Axie-Infinity, NFT-игры «играй ради заработка». Группе хакеров удалось украсть у сети Ronin Network 173 600 эфиров и 25,5 млн долларов США на общую сумму до 635 млн долларов.

2. Wormhole – взлом на 300 млн долларов.

Атака Wormhole была одним из первых взломов перекрестных мостов в 2022 г. Из протокола было изъято 120 000 обернутых токенов Ether (wETH) на общую сумму до 370 млн долларов.

3. Nomad – эксплойт стоимостью 190 млн долларов.

Хакер обнаружил, что недавнее новое обновление смарт-контрактов Nomad позволяет пользователям подделывать транзакции, т. е. никогда не проверяется, внес ли пользователь эквивалентное количество исходных токенов перед предоставлением завернутых версий. Nomad Bridge потерял около 190 млн долларов, 80 % из которых были украдены подражателями первоначального хакера.

4. Binance – взлом на 100 млн долларов

Хакеры подделали транзакцию по выпуску 2 млн новых токенов BNB на сумму 568 млн долларов. Большую их часть им не удалось перевести из-за приостановки Binance всех транзакций и действий в блокчейне.

5. Harmony – хак на 100 млн долларов

Harmony, платформа кроссчейн, где пользователи могут чеканить упакованные токены, потеряла более 100 млн долларов в нескольких криптовалютах в результате взлома.

Принцип работы кроссчейн-мостов

Работа кроссчейн-мостов включает в себя следующие этапы.

1. Блокировка. Процесс начинается с блокировки активов на одной из сетей (называемой исходной сетью). Это может быть блокировка криптовалюты, токенов или других активов. Это гарантирует, что активы не могут быть использованы в исходной сети, пока процесс не будет завершен.

2. Чеканка. Затем, после блокировки активов, создается новый эквивалентный актив в целевой сети. Эквивалентный актив в целевой сети позволяет пользователю взаимодействовать с активами в другой сети.

3. Сжигание. Наконец, когда пользователь решает завершить операцию и вернуть активы на исходную сеть, эквивалентные активы в целевой сети уничтожаются.

4. Разблокировка. После того, как новые активы были сожжены в целевой сети, пользователь может разблокировать свои активы на исходной сети. Это позволяет пользователю восстановить доступ и контроль к исходным активам.

Принцип работы кроссчейн-мостов основан на установлении доверия и обеспечении безопасности операций, осуществляемых между различными блокчейнами. Это делает возможным более гибкое использование активов и данных в разных блокчейнах, расширяя возможности и эффективность блокчейн экосистемы.

Классификация уязвимостей

1. Несанкционированный доступ к приватным ключам.

Большинство мостов принадлежат специальным кошелькам с мультиподписью (множественной подписью). В отличие от обычных кошельков, они используют более одной подписи для подписания транзакции и отправки ее в сеть блокчейна. Это делает его лучше, чем обычный криптокошелек, для работы критически важной инфраструктуры, такой как мосты, поскольку он более безопасен.

Практику управления ключами может быть сложно отслеживать и совершенствовать в организациях любого размера. Несмотря на то, что получить доступ хотя бы к одному закрытому ключу должно быть сложно, три моста были взломаны из-за несанкционированного доступа к нескольким закрытым ключам, которые отвечают за работу мультиподписей.

Как только ключи будут получены, они предоставят хакеру привилегированный доступ, что позволит ему вывести все средства.

Пример: Ronin Network. Ronin Network – это сайдчейн Ethereum, запущенный в феврале 2021 г. Чтобы сократить расходы, разработчики решили использовать в своей цепочке модель Proof of Authority. Используя эту модель, только девять валидаторов смогли подтвердить транзакции. На момент взлома пять из них (более 50 % – ровно столько, сколько нужно для успешной атаки) контролировались партнером Ronin Network – студией *Sky Mavis*, создавшей игру.

Злоумышленник проник в сеть *Sky Mavis* и получил пять подписей, которые использовались для подписания сообщений. То, что последовало дальше, было очевидно: злоумышленник затем подтвердил две транзакции, выведя 173 000 ETH и более 25 млн USDC, причем последние были позже обменяны на ETH.

Пример: Harmony bridge. Harmony Bridge был защищен мультиподписью, которая требовала три из пяти подписей для подписания транзакции. Хотя точный метод, который хакеры использовали для получения контроля над адресами, неизвестен, некоторые представители отрасли предположили, что была использована социальная инженерия.

После того, как хакеры получили секретные ключи, они использовали их для подписи вредоносных транзакций. Это привело к потере 100 млн долларов США в различных токенах и активах.

2. Криптографические атаки.

Пример: Мост BNB. Подделка криптографического доказательства. BNB Bridge функционировал как мост между старой цепочкой Binance Beacon Chain и новой Binance Smart Chain. Злоумышленник использовал его для чеканки 2 млн BNB. К сожалению, криптографический протокол, созданный для моста BNB, позволил злоумышленникам подделать доказательства, необходимые для отправки произвольных сообщений. Хакерам удалось отправить всего два сообщения, но этого было достаточно, чтобы обеспечить выпуск 2 млн новых

токенов BNB, что позволило украсть сумму в 586 млн долларов США.

BNB Bridge использовал IAVL (неизменяемое дерево AVL) для проверки транзакций. Однако хакеру удалось подделать криптографические доказательства для конкретного блока с номером 110217401.

Пример: Wormhole. Обход проверки подписи. Эксплойт Wormhole стал еще одним заметным взломом моста, в результате которого было украдено 326 млн долларов. Проблема с протоколом присутствовала в функции verify_Signatures. В клиентах сети была использована неправильная версия solana_program, содержащая функцию Secp256k1, и фактическая проверка не выполнялась. Это означало, что злоумышленники могли создать учетную запись с данными, которые должна вернуть функция Secp256k1, полностью минуя проверку подписи.

3. Эксплойт нулевых значений.

Пример: Nomad Bridge. Хакеры могли отправлять транзакции без каких-либо доказательств – они просто вызывали функцию процесса напрямую, опустошая мост токенов wBTC.

Такие транзакции не возвращались из-за неправильной инициализации. Потому что после планового обновления контракта нулевой адрес был установлен как доверенный корень, а это означало, что любые доказательства транзакции были действительными.

Другие пользователи заметили взлом и смогли скопировать те же данные транзакции и отправить их самостоятельно, поэтому к взлому присоединилось множество случайных пользователей.

Заключение

Большинство проектов, упомянутых в статье, не проверялись, что является большим тревожным сигналом для любых крупных проектов в наши дни, но более чем распространено в раннюю эпоху криптографии. В некоторых проектах в то время также не было программ Bug Bounty (BBP).

Отсутствие как аудита, так и работающего BBP, не смогло выявить слабые места, присущие конструкции и работе используемых смарт-контрактов и механизмов, даже после того, как мосты начали накапливать пользовательские средства в сотнях миллионов.

Это подчеркивает важность бдительности и профилактических мер безопасности, таких как обеспечение аудита перед запуском и BBP после него, оба из которых работают рука об руку, предотвращая взломы до того, как они произойдут.

Список источников

1. Список активных кроссчейн-мостов. URL: https://defillama.com/protocols/Bridge (дата обращения: 20.11.2023).

2. *Berenzon D.* Blockchain bridges: building networks of cryptonetworks. 2021. URL: https://medium.com/1kxnetwork/blockchain-bridges-5db6afac44f8 (дата обращения: 19.11.2023).

3. *Bhuptani A.* The interoperability trilemma. 2021. URL: https://blog.connext.network/the-interoperability-trilemma-657c2cf69f17 (дата обращения: 19.11.2023).

УДК 004.056.53 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-50-55**

Ю. Д. Корсакова*
студент
В. С. Коломойцев*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ USB-КЛЮЧЕЙ КАК СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА

Работа посвящена исследованию средств защиты программного обеспечения от несанкционированного доступа. Представлено исследование способов защиты программного обеспечения, выявлены позитивные и негативные стороны данных способов защиты. Проведено сравнение аппаратных методов защиты программного обеспечения, показано преимущество USB-ключей. Выполнено исследование существующих способов защиты USB-ключа, предложены способы защиты USB-ключа от несанкционированного доступа.
Ключевые слова: *аппаратная защита информации, USB-ключ, защита программного обеспечения, информационная безопасность, шифрование данных, флэш-накопитель.*

Ju. D. Korsakova*
Student
V. S. Kolomoitcev*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ON THE ISSUE OF ENSURING THE SECURITY OF USB KEYS AS A MEANS OF PROTECTING SOFTWARE FROM UNAUTHORIZED ACCESS

The work is devoted to the study of software protection tools against unauthorized access. The paper presents a study of software protection methods, identifying the positive and negative sides of these methods. It was comparing hardware software protection methods, showing the advantage of USB keys. The study of analyzing existing ways to protect a USB key was conducted, and ways to protect a USB-key from unauthorized access are proposed.
Keywords: *hardware information protection, USB key, software protection, information security, data encryption, flash drive.*

Введение

В современном мире все больше компаний разрабатывают свое программное обеспечение (ПО) с целью продажи, автоматизации бизнес-процессов, упрощения работы людей или обеспечения безопасности. При этом само ПО также нуждается в обеспечении защиты от несанкционированного доступа (НСД). Злоумышленник может взломать ПО с целью дальнейшей его перепродажи или совершить иные противоправные действия, что может принести ущерб компании. Во избежание описанных ситуаций, необходима реализация и внедрение средств и методов защиты ПО. Рассмотрим некоторые методы защиты ПО.

1. *Программная защита ПО.* Данный метод защиты ПО подразумевает использование специальных программ и инструментов, которые помогают обеспечить безопасность ПО. Они выполняют различные функции, такие как обнаружение и предотвращение атак, шифрование данных, контроль доступа и многое другое. Особенностью данного метода является то, что пользователю требуется только запустить само ПО. Далее, программа сама предложит способ аутентификации и авторизации пользователя. Программная защита может быть выполнена посредством онлайн- или офлайн-защиты.

Офлайн-защита предполагает защиту ПО без доступа в Интернет, т. е. не имеет подключения к внешним серверам. С одной стороны, при таком подходе данные не могут утечь

в сеть, так как вычислительное устройство, на котором располагается ПО, может не иметь выхода в сеть. С другой стороны, могут возникать сложности с получением актуального обновления ПО, сложности в реализации механизмов контроля изменений, а также существует вероятность, что злоумышленник может использовать поддельные копии лицензий.

Онлайн-защита предполагает, что программа связывается с внешними серверами, благодаря чему появляется возможность контроля лицензии, используя более доверенное устройство. Указанный способ защиты является безопаснее, чем офлайн-защита, в силу того, что злоумышленнику потребуется предпринять больше усилий для реализации угрозы подделки лицензии, так как теперь ключевой этап проверки проходит на стороне внешнего устройства. Однако метод имеет и свои недостатки, к которым можно отнести уязвимости веб-приложений, уязвимости в сетевой безопасности, уязвимости в защите от вирусов.

2. *Аппаратная защита*. Зачастую, когда компании разрабатывают ПО для внутреннего пользования, нужен такой метод защиты, чтобы пользоваться ПО можно было только в пределах компании. В таких случаях целесообразно использовать аппаратные средства защиты [1].

Аппаратная защита является одним из наиболее надежных методов, который сочетает в себе преимущества рассмотренных ранее направлений (в том числе за счет того, что нередко использует программную защиту для полноценной работы). За лицензирование отвечает электронный USB-ключ, которому не требуется подключение к сети. Достоинством такого метода является то, что лицензию можно убрать за пределы операционной системы, ключ хранится вне персонального компьютера (ПК). Программное обеспечение, которое защищено при помощи аппаратного ключа, может использоваться на тех системах, где подключения к сети строго ограниченно. Это, к примеру, правительственные объекты или промышленность. Также достоинством является то, что электронному ключу не требуются различные решения для разных программных сред, а возможности лицензирования очень гибкие.

Сравнение аппаратных методов защиты программного обеспечения

Рассмотрим подробнее некоторые готовые решения аппаратной защиты ПО.

1. USB-ключ – это флеш-накопитель, подключаемый к порту компьютера для проверки подлинности лицензии [2]. Программное обеспечение, использующее USB-ключ, отправляет запросы для аутентификации пользователя. Если ожидаемый код проверки не может быть получен, программа автоматически завершается.

Хорошим примером такого ключа является eToken – персональное средство строгой аутентификации и хранения данных, на аппаратном уровне поддерживающее работу с цифровыми сертификатами и ЭЦП [3, 4]. Ключевым недостатком eToken является высокая стоимость одного устройства [3].

2. Смарт-карты представляют собой пластиковые карты со встроенной микросхемой. В большинстве случаев смарт-карты содержат микропроцессор и операционную систему, контролирующую устройство и доступ к объектам в его памяти [2]. Кроме того, смарт-карты, как правило, обладают возможностью проводить криптографические вычисления. Недостатком смарт-карт является требование установки считывателя с драйверами, что нередко является неудобным [3].

Таблица 1

Сравнительная характеристика аппаратных методов защиты ПО

Тип устройства	Достоинства	Недостатки
USB-токен	Работает по принципу plug-in-play (без сторонних средств), обладает широкими функциональными возможностями	Сравнительно высокая цена за одно устройство
iButton	Разработаны для сложных (критических) условий эксплуатации	Для работы необходимо применение специального считывателя и установка драйвера на вычислительное устройство, ограниченный функционал, нет возможности реализации криптографических методов и алгоритмов
Смарт-карты	Широкие функциональные возможности, низкая стоимость эксплуатации	Требуется установка считывателя с драйверами для компьютера

3. Еще одним устройством хранения ключевых данных является iButton. Каждый iButton имеет уникальный номер (идентификатор), записываемый в процессе изготовления. Все устройства iButton выполнены по жестким стандартам и выдерживают серьезные механические и температурные нагрузки. Для подключения iButton к компьютеру требуется дополнительная установка считывателя, подключаемого, в зависимости от типа считывателя, к портам RS232 и USB [3].

В табл. 1 приведено сравнение рассмотренных технологий аппаратной защиты.

Проанализировав все вышеупомянутые готовые решения, можно сделать вывод, что USB-ключ обладает весомыми преимуществами над остальными из рассмотренных технологий. Об этом говорит следующее:

1) USB-ключ обладает высокой функциональностью. С помощью USB-ключа можно шифровать хранящиеся на нем данные, так как он имеет встроенный криптографический процессор, а также он имеет защищенную память EEPROM, которая позволяет хранить ключи шифрования, пароли, сертификаты и другие важные данные;

2) возможность выполнения операций с электронной цифровой подписью и пин-кодом [1];

3) удобство использования. Пользователю не требуется устанавливать дополнительно никаких дополнительных систем и средств. При этом для работы со смарт-картами, похожими по функциональности на USB-ключи, требуется специальный считыватель.

Как было отмечено ранее, ключевой недостаток указанного решения – это высокая стоимость устройства. Однако, если рассмотреть данный вопрос более комплексно, как показано в табл. 2, то можно прийти к выводу, что цена внедрения данной технологии не столь существенно отличается от иных технологий [5]. Таким образом, видно, что высокая стоимость устройства является незначительным фактором, так как вместе с дополнительными закупками для других устройств, таких как iButton и смарт-карты, USB-ключ выходит даже дешевле.

Исходя из сказанного, USB-ключ является более удобным и практичным аппаратным методом защиты ПО. С его помощью информация на персональном компьютере шифруется, и злоумышленник не сможет запустить программу без данного ключа [1]. Однако возникает необходимость защиты самого ключа – USB-ключ можно украсть, потерять, скопировать. USB-флэш-носители обладают двумя обширными уязвимостями в информационной безопасности: утечка данных благодаря маленьким размерам устройства и системная компрометация через инфицирование компьютерными вирусами, вредоносными и шпионскими программами [6]. К числу уязвимостей USB-носителей также относится уязвимость прошивки микроконтроллеров флэш-носителей (BadUSB).

Способы решения проблем безопасности USB-ключей

Исследуем возможные способы защиты USB-ключа от упомянутых выше уязвимостей и, по возможности, предложим, как их можно доработать.

1. Для предотвращения вероятной прошивки микроконтроллера, возможным решением может стать заполнение оставшегося свободного места на флэш-памяти «предзаписанными» данными. Таким образом, у злоумышленника будет меньше возможности записать вредоносный код. Одним из вариантов реализации указанного решения может стать разбитие свободного пространства флэш-носителя на блоки равного размера (например, 128 или 64 Мб), в которые будет записана информация, не представляющая ценности. В дальнейшем, при необходимости, администратор может очистить соответствующие блоки данных требуемого

Таблица 2

Сравнительная характеристика стоимости аппаратных средств защиты информации

Средство защиты на базе	Идентификатор	Устройство ввода-вывода				Итого
		считыватель	контактное устройство	адаптер	удлинительный кабель	
USB-ключ	От 25 $	–	–	–	От 5 $	От 30 $
iButton	От 9 $	–	От 5 $	От 13 $	–	От 26 $
Смарт-карты	От 3 $	От 100 $	–	–	–	От 103 $

размера и записать в освободившуюся область требуемую информацию [7].

Учитывая, что процесс заполнения «предзаписанными» данными блоками равного объема не предполагается операционными системами по умолчанию, то рассматривается возможность модификации указанного метода следующим образом: в одном из загрузочных блоков памяти записывается программа для заполнения свободного пространства флэш-памяти. Таким образом во время начала работы с готовым устройством вся свободная область памяти будет размечена и заполнена (например, блоками размером 32 Мб). Таким образом, специалисту не потребуется заполнять свободные области памяти данными вручную, а у злоумышленника не будет возможности записать вредоносный код.

По сравнению с другими методами защиты информации, заполнение памяти может быть эффективным, так как при любом методе аутентификации есть некоторая вероятность, что злоумышленник узнает пароль, сможет войти в систему и записать вредоносные данные на флэш-накопитель. При переполнении памяти записать данные не представляется возможным.

2. При использовании USB-носителей информации существует риск их утери или кражи, с последующим несанкционированным доступом к нему. Для снижения вероятных неблагоприятных последствий при реализации указанных рисков, возможно добавление на USB-ключ параметров удаленного управления, таких как, например, удаленная очистка и блокировка [8]. При использовании данного подхода, в некоторой степени, решается проблема возникновения неблагоприятных последствий от утери USB-ключа, так как для корректного доступа к нему необходимо сначала пройти процедуру аутентификации.

Такое решение может являться эффективным, по сравнению с другими решениями (проблемы кражи ключа), так как вероятность того, что злоумышленник случайно подберет ключ шифрования, крайне мала, или к моменту кражи алгоритм шифрования станет не криптостойким [8]. При таких обстоятельствах у злоумышленника просто не будет возможности достать ключ за необходимый период времени.

Несмотря на возможные позитивные стороны решения, он может быть неудобен в реализации USB-ключа, так как для обеспечения необходимого уровня безопасности, необходима процедура подтверждение владельца ключа. Вероятные способы решения указанного вопроса, рассмотрим в дальнейшем.

3. Решением некоторых проблем обеспечения безопасности USB-ключа может быть шифрование данных на самом ключе. Для аппаратного шифрования устройства используется специальный чип, расположенный на печатной плате устройства. В него встроена функция, которая создает ключи шифрования. Данные шифруются автоматически и почти мгновенно дешифруются, при вводе пользовательского пароля. В этом сценарии получить доступ к данным без знания пароля практически невозможно [8, 9].

Генерацию ключа шифрования также можно реализовать с помощью протоколов генерации секретного ключа самим ПО. При установке ПО необходимо реализовать генерацию секретного ключа между ПО и USB-ключом и зашифровать данные ПО и данные USB-ключа на секретном ключе. При повторном соединении будет проходить процедура аутентификации и данные, будут расшифровываться, при условии, что был введен (получен ПО) секретный ключ. Таким образом, другие программы не смогут считать данные с флэш-накопителя, так как не будут знать секретного ключа [8].

Модификацией данного метода может стать аутентификация ключа и ПО. Один ключ соотносится с каким-то одним ПО (у каждого ключа и ПО есть свой уникальный номер). Данные ключа и ПО не только шифруются, но и происходит первоначальная аутентификация ключа и ПО. Таким образом, предполагается, что пользователь с другим ПО не сможет воспользоваться данным ключом.

4. Другим методом защиты USB-ключа может стать ведение журнала событий и отслеживание геопозиции устройства. Данный подход потребует усовершенствования самого USB-носителя, так как по умолчанию геометок у USB-носителей нет. Для защиты данных от кражи можно реализовать функцию стирания данных при отдалении USB-ключа от ПК (на котором установлено совместимое с USB-ключом ПО), далее, чем на заранее заданное расстояние. Метод может быть реализован с помощью установки ГЛОНАС-трекера (или GPS) на USB-ключ или аппаратного радиоизлучателя, согласованного с устройством. В случае использования трекера, он использует сигнал спутниковой системы навигации для определения местоположения устройства и передает информацию на ПК владельца.

Метод может стать эффективнее, чем шифрование, однако не безопаснее для данных пользователя [7]. При стирании всех данных поль-

зователь не сможет их восстановить. Таким образом, пользователю будет требоваться создавать резервные копии данных, которые, в свою очередь, также необходимо защищать.

5. USB-ключ может быть защищен собственным паролем [7]. Для этого создаются, например, устройства со встроенными кнопками для ввода пароля. Данное действие при правильном вводе пароля «сообщает» USB-ключу, что владелец USB-ключа подтвержден и можно начать процесс аутентификации непосредственно с компьютером [10]. При этом запрос пароля может происходит и на самом компьютере (через специальный интерфейс или сервис), но это может быть менее безопасным решением.

Таким образом, можно пойти дальше, и установить, например, перегородки между контактами (физической или электронной), которые должны соприкасаться с контактами на ПК. После ввода пароля или успешного сканирования отпечатка пальца, данная перегородка будет отодвигаться (контакт замыкаться). Как только работа с USB-ключом будет окончена, контакт будет повторно размыкаться.

Стоит отметить, что использование методов биометрической аутентификации будет являться более приемлемым не только с точки зрения того, что будет увеличена вариативность возможных паролей для получения доступа к устройству, но и также по причине того, что современные системы биометрической аутентификации имеют сравнительно невысокую стоимость своего внедрения [11].

Исходя из вышесказанного, для защиты USB-ключа можно использовать набор из упомянутых ранее подходов:

1) для проверки подлинности пользователя USB-ключа предлагается использовать процедуру сканирования отпечатка пальца для разблокировки самого флэш-носителя. При первом использовании сканируется отпечаток пальца пользователя, данные записываются на флэш-память. При дальнейших использованиях сравниваются параметры отсканированного изображения, с внесенными в память – если они совпадают, то замыкаются контакты и USB-ключ готов к использованию;

2) для защиты USB-ключа от кражи предлагается внедрить в устройство геометку или радиометку и записать в память программу для экстренного удаления данных. При срабатывании сигнала отдаления от ПК будет выполняться данная программа;

3) для проверки подлинности программы, взаимодействующей с устройством (ключом), предполагается использовать процедуру аутентификации и шифрование данных на самом устройстве и ПО, используя секретный ключ;

4) для защиты от записи на USB-ключ вредоносного кода, необходимо заполнить оставшуюся свободную память устройства, используя решение, описанное в п. 1.

Заключение

В настоящее время вопрос обеспечения безопасности программного обеспечения привлекает значительное внимание. В статье было проведено исследование аппаратных средств защиты ПО, а также показано их преимущество перед программными.

Исследованы некоторые способы защиты программного обеспечения от несанкционированного доступа, по результатам которого показан один из наиболее безопасных способов – с помощью USB-ключа. В силу того, что такого рода флэш-накопители требуют усиленной защиты, в сравнении с обычными USB-накопителями, то также выявлены недостатки существующих методов защиты с помощью USB-ключа. Были рассмотрены и предложены вероятные подходы для защиты устройства от несанкционированного копирования и утери.

Список источников

1. Аппаратные средства защиты информации. URL: https://cyber-defence.ru/apparatnye-sredstva-zaschity-informatsii/ (дата обращения: 05.12.2023).

2. Сравнительный анализ защищенных ключевых носителей. URL: https://www.vrsystems.ru/stati/sravnitelnii_analiz_zashishennix_klyuchevix_nositelei.htm (дата обращения: 05.12.2023).

3. Аппаратные ключи защиты. URL: https://compress.ru/article.aspx?id=10134 (дата обращения: 04.12.2023).

4. *Ананченко И. В., Смирнов П. И., Шапаренко Ю. М.* Информационная безопасность телекоммуникационных систем. Ч. 1: Аппаратные ключи eToken. Средство защиты eToken Network Logon: учеб. пособие. СПб.: РГГМУ, 2016. 24 с.: ил.

5. Защита компьютеров: электронные системы идентификации и аутентификации. URL: https://www.itweek.ru/infrastructure/article/detail.php?ID=67112 (дата обращения: 06.12.2023).

6. *Ковалев А. И.* Защита информации с помощью электронных ключей // Информационные технологии и прикладная математика // Межвуз. сб. аспирант. и студ. работ. 2015. № 5. С. 57.

7. *Андриевская Н. П., Верещагина Е. А.* Проблемы безопасности USB-накопителей / Морской гос.

ун-т им. адмирала Г. И. Невельского. Владивосток, 2019. С. 1.

8. *Новиков С. А.* Защита данных путем полного шифрования внешних дисков и USB-устройств с помощью технологии BitLockerToGo // Молодой ученый. 2016. № 13 (117). С. 336.

9. *Зайцев А. П., Шелупанов А. А., Мещеряков Р. В.* Технические средства и методы защиты информации: учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 2009. 508 с.

10. *Михайлова А. А., Уманский С. А., Шустрова А. Н.* Анализ рынка программно-аппаратных средств защиты информации от несанкционированного доступа // Цифровая наука. 2021. № 4-2. С. 3.

11. Сравнительный анализ методов биометрической идентификации личности с применением нейронных сетей / В. А. Дударев, Т. И. Новикова, Е. А. Тришкин, А. Н. Черкасов // Инновац. науч. исслед. 2021. № 11-1 (13). С. 135–142.

УДК 004.85; 004.056 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-56-58**

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

АНАЛИЗ ПЛАТФОРМ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Проведен анализ платформ, имеющих бесплатные ресурсы для реализации машинного обучения, которые предоставляют функционал для решения научно-практических задач и проведения исследований. Выделены особенности этих платформ, их преимущества и недостатки. Платформы представленной категории являются базовыми для ознакомления с реализацией моделей машинного обучения в облачных средах, при большем объеме задач необходимо использовать более мощные решения. Исключением является платформа Kaggle, которая предоставляет достаточный функционал для серьезных исследований.
Ключевые слова: *машинное обучение, вычислительные ресурсы, облачные вычисления.*

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

ANALYSIS OF PLATFORMS FOR IMPLEMENTING MACHINE LEARNING

An analysis was made of platforms that have free resources for implementing machine learning, which provide functionality for solving scientific and practical problems and conducting research. The features of these platforms, their advantages and disadvantages are highlighted. The platforms in this category are basic for getting acquainted with the implementation of machine learning models in cloud environments; for a larger volume of tasks, it is necessary to use more powerful solutions. An exception is the Kaggle platform, which provides sufficient functionality for serious research.
Keywords: *machine learning, computing resources, cloud computing.*

Введение

В современном мире технологий, где инновации играют решающую роль в различных областях, машинное обучение становится ключевым элементом в создании интеллектуальных систем. Этот быстро развивающийся домен требует не только глубокого понимания алгоритмов машинного обучения [1], но и мощных вычислительных ресурсов для исследования поведения систем при различных параметрах настройки. Такие ресурсы не всегда доступны на локальных машинах, в таком случае хорошей практикой является использование платформ в сети Интернет, предназначенных для разработки и тестирования моделей машинного обучения [2]. В данной статье мы сосредоточим внимание на нескольких платформах, предоставляющих функционал для исследований в сфере машинного обучения.

Цель данной статьи заключается в проведении анализа некоторых платформ для реализации машинного обучения, выявления их особенностей, преимуществ и недостатков. Мы рассмотрим функциональные возможности и удобство использования.

Общее среди всех платформ

Количество платформ для реализации машинного обучения довольно обширно и включает в себя более десятка решений. В данной работе будут рассмотрены некоторые из них, а именно:

1) Google Collab;
2) Kaggle;
3) Noteable;
4) DeepNote;
5) Paperspace Gradient SDK.

Причиной выбора именно такого перечня решений, прежде всего, является возможность

бесплатного использования предоставляемых ресурсов. В основе этих решений лежит интерактивная инструмент Jupyter Notebook, который позволяет выполнить последовательный запуск ячеек с кодом в произвольном порядке с удобным наглядным отображением графиков, комментариев и математических формул. Также все решения имеют большое количество предустановленных библиотек, полезных для визуализации и обучения различных видов моделей. Еще одной общей чертой является поддержка языков R и Python 3.

Описание платформ

Google Collab. Платформа имеет интуитивно понятный интерфейс и предлагает не очень обширное количество различных настроек. Они ограничиваются выбором языка, который будет использоваться в дальнейшем, а также выбором вычислительных ресурсов. Предоставляется возможность обучения с использованием vCPU, T4 GPU и TPU, но в бесплатной версии на выделение ресурсов для работы может уходить разное время в зависимости от загруженности серверов. Пользователи могут запускать ноутбуки длительностью до 12 ч, хотя это время варьируется в зависимости от, опять-таки, загруженности серверов и паттерна работы пользователя. Безусловным плюсом является удобная интеграция с Google Drive. Платформу можно назвать базовым решением для реализации машинного обучения с использованием облачных ресурсов.

Kaggle. Позиционируется как система организации конкурсов среди исследователей данных. Как и Google Collab, принадлежит компании *Google*. На платформе предусмотрены соревнования, целью которых является решение актуальных проблем, поставленных как крупными предприятиями, так и самими учеными. В силу этого ресурс содержит в свободном доступе большое количество различных датасетов и ноутбуков с использованием этих датасетов, что может являться хорошим примером для начинающих. Также площадка содержит обучающую информацию о различных аспектах машинного обучения. В рабочей среде ноутбуки могут быть запущены на vCPU, P100 GPU, T4 x2 GPU и TPU. Помимо достаточно разнообразного для бесплатной среды набора вычислительных ресурсов платформа позволяет стабильно запускать ноутбуки длительностью до 12 ч при использовании GPU и до 9 ч при использовании TPU. При этом существует предел использования предоставляемых ресурсов, который составляет от 30 ч в неделю.

Noteable. Является платформой для совместной работы с ноутбуками. Главной особенностью является возможность визуализации данных без использования программного кода. Другим преимуществом платформы выступает возможность подключения к базе данных для доступа к данным, необходимым для обучения, а также работа с базой данных непосредственно в ячейках. Существенным минусом же выступает ограниченность в вычислительных ресурсах. В рамках бесплатной версии вычисления доступны лишь с использованием vCPU и 4GB RAM, что не позволяет проводить исследования с использованием большого количества данных или сложным архитектур моделей обучения.

DeepNote. Платформа предоставляет обширные возможности для интеграции в рабочую среду различных ресурсов с данными. В их число входят различные базы данных, Google Drive, Docker контейнеры, GitHub-репозитории и другие ресурсы. К недостаткам платформы относится наличие ограничения на количество одновременных пользователей, принимающих участие в разработке ноутбука – до трех человек, а также ограничение на одновременное количество проектов – до пяти. Также недостатком являются вычислительные ресурсы, предоставляемые на бесплатной основе – 2vCPU и 5GB RAM. Это накладывает такие же ограничение при выборе моделей для обучения, как и в случае с платформой Noteable.

Paperspace Gradient SDK. Выступает в качестве платформы, где для каждого этапа разработки от выбора и обучения модели до ее размещения для использования присутствует удобный графический интерфейс. Другим преимуществом выступает наличие шаблонов для различных целей, например: базовый шаблон с использованием как библиотеки PyTorch, так и TensorFlow, шаблон для реализации генеративных моделей, шаблон для реализации моделей типа текст-изображение и др. Бесплатный функционал платформы ограничен лишь загрузкой моделей в среду разработки, а также доступом к самой среде. В качестве вычислительных ресурсов предлагаются следующие опции: 2vCPU и 4GB RAM; 8vCPU, 30GB RAM и 8GB GPU. На момент написания статьи эти варианты не были доступны ввиду высокой загруженности платформы. Также существуют ограничения на время существования одной сессии – 6 ч, на количество одновременно запущенных ноутбуков – один ноутбук, и на общее количество ноутбуков – пять ноутбуков.

В таблице приведена сравнительная характеристика перечисленных решений на основании наиболее значимых пунктов.

Сравнительная характеристика выбранных платформ

Платформа	Время одной сессии	Наличие GPU
Google Collab	До 12 ч	+
Kaggle	До 12 ч	+
Noteable	Не ограничено	–
Saturn Cloud	Не ограничено	–
DeepNote	Не ограничено	–
Paperspace Gradient SDK	До 6 ч	+

Заключение

В работе был проведен анализ платформ, имеющих бесплатные ресурсы для реализации машинного обучения, которые предоставляют функционал для проведения работ и исследований. Были указаны особенности этих платформ, выделены их преимущества и недостатки. Платформы представленной категории являются базовыми для ознакомления с реализацией моделей машинного обучения в облачных средах, при более тщательном изучении необходимо будет использовать более мощные платные решения. Исключением является платформа Kaggle, которая предоставляет достаточный функционал для серьезных исследований.

Список источников

1. *Беззатеев С. В., Елина Т. Н., Красников Н. С.* Использование методов машинного обучения в siem-системах для анализа и автоматизации: достоинства и недостатки // Методы и техн. средства обеспечения безопасности информации. 2023. № 32. С. 19–20.

2. *Беззатеев С. В., Елина Т. Н., Красников Н. С.* Исследование методов машинного обучения для обеспечения информационной безопасности в розничных торговых операциях // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 3. С. 155–166.

УДК 65.011.56 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-59-62**

А. Б. Морозов*
аспирант
А. А. Безгодов*
кандидат военных наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ СИСТЕМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТОВАРА НА СКЛАДЕ

Системы идентификации товара на складе играют важную роль в эффективном управлении запасами и обеспечивают точность и надежность при отслеживании и контроле инвентаря. Рассмотрены основные аспекты таких систем, и проанализированы их преимущества и недостатки. В зависимости от специфики складской деятельности и требований, можно выбрать наиболее подходящую систему идентификации товара. Важно учитывать не только преимущества, но и ограничения и стоимость внедрения каждой системы. Комбинирование различных типов идентификации может быть эффективным решением для обеспечения максимальной точности и эффективности управления запасами.
Ключевые слова: *штрихкод, Radio Frequency Identification, идентификация, склад.*

A. B. Morozov*
PhD Student
A. A. Bezgodov*
PhD, Military, Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ANALYSIS OF GOODS IDENTIFICATION SYSTEMS IN A WAREHOUSE ABSTRACT

Identification systems for goods in a warehouse play a crucial role in efficient inventory management, ensuring accuracy and reliability in tracking and controlling inventory. In this analysis, we will examine the key aspects of such systems and analyze their advantages and disadvantages. Depending on the nature of warehouse operations and requirements, the most suitable identification system can be chosen. It is important to consider not only the benefits but also the limitations and cost of implementing each system. Combining different types of identification can be an effective solution to achieve maximum accuracy and efficiency in inventory management.
Keywords: *barcode, radio frequency identification, identification, warehouse.*

Продуманный порядок размещения товаров на складе помогает быстро ориентироваться в продукции, грамотно производить прием новых партий товара, вводить автоматизацию управления складскими процессами и упрощать грузообработку.

Задача организации размещения объектов хранения на складе для обеспечения оптимизации доступа к данным объектам является одной из важных задач практически во всех производствах. Есть ряд способов, таких как оптимизация площади, оптимизация логических процессов, системы адресного хранения, внедрения автоматизации и оптимизировать процессов склада с помощью технологии автоматической идентификации.

В данной статье мы рассмотрим процесс автоматической идентификации склада и две основные технологии.

Идентификация товарной позиции является ключевым аспектом эффективного управления складским хозяйством. Наличие правильной и точной информации о каждой позиции на складе позволяет оптимизировать процессы приемки, хранения, отгрузки и инвентаризации. В данной статье мы рассмотрим важность идентификации продукции на складе, а также основные методы, которые помогают в этом процессе [1].

Существует несколько способов идентификации продукции:

1) штрихкоды – являются самым распространенным методом идентификации продукции. Они представляют собой набор полос и промежутков, которые представляют определенную числовую информацию, связанную с продуктом. Штрихкоды могут быть считаны с помощью сканера, что позволяет быстро и точно идентифицировать продукцию;

2) ручная идентификация: в некоторых случаях продукция может быть идентифицирована вручную, например, с помощью наклеек, этикеток или других маркировок, содержащих информацию о продукте;

3) RFID (Radio Frequency Identification) – это метод идентификации, использующий радиочастотные сигналы для чтения информации, сохраненной на специальном микрочипе, присоединенном к продукту. RFID может быть полезен для идентификации продукции в реальном времени и для отслеживания товаров в производственном и логистическом процессе.

Идентификация продукции тесно связана с учетом. Учет продукции включает в себя сбор и хранение информации о продукте в различных фазах его жизненного цикла, включая приобретение, производство, хранение, продажу и использование. Идентификация продукции позволяет учету связывать информацию о продукте с определенным товаром или партией товаров. Это облегчает отслеживание продукции во всей цепочке поставок, контроль за запасами, определение стоимости и управление производственными процессами [2, 3].

Оптимизация процессов склада с помощью технологий автоматической идентификации имеет множество преимуществ и может значительно повысить эффективность работы склада. 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 штрихкоды или RFID-метки на товарах, что сокращает время, затрачиваемое на инвентаризацию, и улучшает точность ведения учета;

3) снижение ошибок. Технологии автоматической идентификации минимизируют возможность человеческой ошибки при обработке идентификационных данных и упрощают процесс отслеживания товаров на складе;

4) улучшение прогнозирования спроса. Автоматическая идентификация товаров позволяет более точно отслеживать данные о продажах и складских запасах, что облегчает прогнозирование спроса и позволяет предотвратить дефицит или переизбыток товаров на складе;

5) улучшение управления поставками. Технологии автоматической идентификации позволяют автоматически отслеживать поставки и контролировать их количественные и качественные параметры. Это снижает риски пропуска поставок или получения бракованных товаров;

6) упрощение отслеживания путей перемещения товаров. Автоматическая идентификация позволяет легко определить путь перемещения товаров на складе, что помогает улучшить планирование и оптимизацию процессов.

Одним из основных методов идентификации товара на складе является использование штрихкодов. Штрихкоды представляют собой печатные или нанесенные на товар уникальные символы, которые могут быть считаны с помощью специальных считывающих устройств. Каждый штрихкод содержит информацию о товаре, такую как его наименование, артикул, цена и другие детали. Считывание штрихкода позволяет оператору склада быстро определить товар и внести необходимую информацию в систему управления складом.

Получается, что штрихкод – это средство автоматической обработки данных. При этом разная информация зашифровывается в разных видах штрихкода, но основными все же являются:

– одномерные (состоят из черных и белых полос различной ширины, с зашифрованной в них последовательностью цифр и букв непосредственно под кодом);

– двумерные (чаще всего квадратные – содержат в себе гораздо больший объем информации, зашифрованной в вертикальном и горизонтальном направлениях одновременно).

У штрихкодов есть множество плюсов, вот некоторые из них:

1) автоматизация процесса. Штрихкоды позволяют быстро и точно считывать информацию о товаре или услуге. Это позволяет сократить время, затраченное на ввод данных вручную, и снижает возможность ошибок;

2) улучшение эффективности работы: благодаря возможности быстрого сканирования товаров или услуг с помощью штрихкодов, улучшается процесс инвентаризации, пополнения запасов и учета продаж;

3) удобство использования: штрихкоды легко наносятся на упаковку товаров или на бумажные наклейки. Они могут быть разных размеров и форм, что облегчает их применение на различных поверхностях;

4) повышение точности: при использовании штрихкодов вероятность ошибки при вводе информации снижается до минимума. Это особенно важно в розничной торговле, где каждая ошибка может привести к потере денег или клиентов;

5) стандартизация: штрихкоды имеют определенный формат и стандарты, что обеспечивает их универсальность и совместимость. Это позволяет использовать их в разных странах и отраслях.

Но также стоит отметить недостатки данной системы:

1) высокая стоимость системы автоматизации;
2) низкая износоустойчивость меток;
3) расходы на обучение персонала;
4) сбои программного обеспечения (ПО).

Еще одним методом идентификации товара является использование RFID-технологий. RFID – это способ бесконтактной идентификации объектов посредством радиочастотного считывания метки. Каждый товар оснащается специальным RFID-меткой, которая содержит уникальный идентификатор и прочую информацию. Считыватель, размещенный на складе, обнаруживает наличие метки и передает информацию в систему управления складом. На рисунке показана упрощенная схема работы RFID системы. RFID-технологии позволяют автоматизировать процесс идентификации товара и значительно сократить время на выполнение операций [4].

Классификация RFID-технологий может быть проведена по различным критериям.

1. Диапазон частоты:

– низкочастотные (Low Frequency, LF) – 30–300 кГц;
– высокочастотные (High Frequency, HF) – 3–30 МГц;
– ультравысокочастотные (Ultra-High Frequency, UHF) – 300 МГц – 3 ГГц;
– магнитные (Megahertz Frequency, MF) – 1–3 МГц;
– супергетеродинные (Super High Frequency, SHF) – 3–30 ГГц.

2. Тип метки:

– пассивные метки, которые работают только при получении энергии от считывателя;
– активные метки, которые имеют собственный источник питания и могут передавать данные независимо от считывателя;
– полупассивные метки (или полуактивные), которые имеют собственный источник питания только для передачи данных, но получают энергию от считывателя для приема данных.

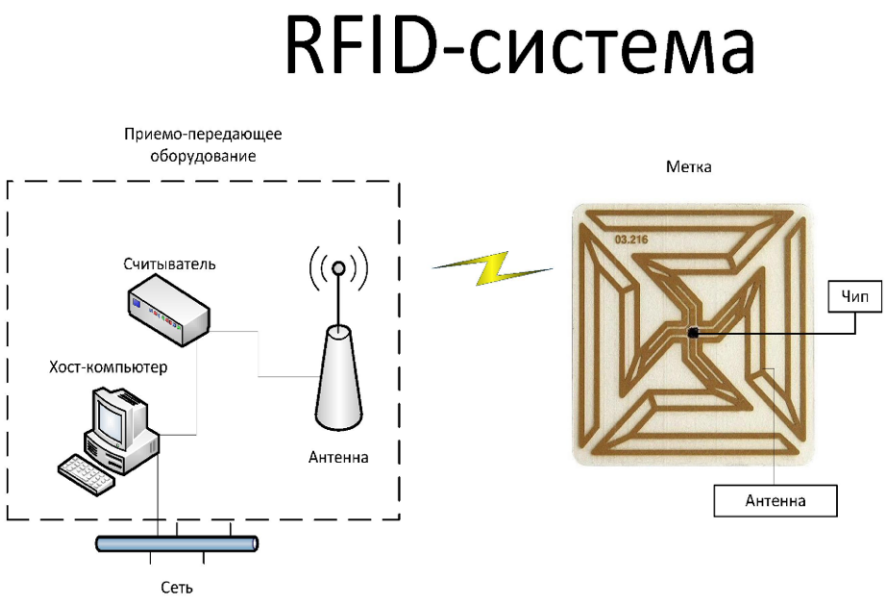
3. Размер метки:

– крупные метки, использование которых ограничено размером и весом;
– маленькие, или микрометки, которые могут быть встроены в устройства, такие как смарт-карты или метки багажа в аэропортах.

4. Применение:

– посредством контакта (например, ближнее поле);
– бесконтактное (например, дальнее поле).

Кроме того, существуют различные стандарты и спецификации для RFID технологий, такие как EPC Gen2, ISO 15693, ISO 14443 и др.



Пример RFID-системы

Система радиочастотной идентификации на складе имеет ряд плюсов:

1) одновременно считывать несколько RFID-меток, верно идентифицируя каждую и не искажая записанные данные, – некоторые устройства распознают до 1000 меток в секунду;

2) использовать одну и ту же RFID-этикетку несколько раз – код, информация об изделии могут перезаписываться на метку;

3) быстро находить товары и проводить инвентаризацию;

4) распознавать теги при перемещении объектов из одной зоны в другую;

5) записывать на радиометку большой объем информации (до 512 000 байт) и закрывать нежелательный доступ к ней паролем;

6) возможность пометить каждый элемент в партии и быть уверенным, что там, где хранится несколько товарных позиций, находится нужное количество позиций;

7) большая вариация видов меток, которые можно подобрать под задачу.

Также к плюсам технологии RFID относится высокая скорость работы считывателей, в зависимости от производителя имеет разные уровни защиты тегов от подделки и их устойчивость к воздействию окружающей среды.

Минусы применения RFID-системы:

1) чувствительность к помехам;

2) непригодность поврежденной метки к дальнейшему использованию. Тогда как со штрихкодами можно работать, даже если они испорчены на 30 %;

3) цена оборудования. RFID-считыватель дороже, чем устройство для работы со штрихкодами. То же касается и принтеров для записи данных и печати радиометок. Их стоимость в несколько раз выше, чем цена устройств для создания этикеток со штрихкодами;

4) расходы на обучение персонала;

5) сбои в работе ПО.

RFID-технология играет важную роль в текущей и будущей автоматизации процессов в различных отраслях. Она позволяет эффективно управлять инвентарем и активами, а также обеспечивать безопасность и четкость ведения учета.

RFID помогает сократить затраты на временное и человеческое трудоемкое выполнение задач и минимизирует ошибки при отслеживании и идентификации объектов. Эта технология также повышает скорость и точность процессов, что приводит к улучшению эффективности и повышению уровня обслуживания для клиентов.

RFID имеет потенциал продолжать развиваться и интегрироваться с другими технологиями, такими как Интернет вещей (IoT) и искусственный интеллект (ИИ), для создания еще более «умных» и автоматизированных решений.

В целом RFID-технология имеет широкий спектр применения и потенциал принести значительную пользу во многих отраслях. Однако организации должны внимательно изучить свои потребности и оценить преимущества и риски перед внедрением RFID-системы.

Кроме того, внедрение представленных систем можно использовать для идентификации товара на складе. Такие системы базируются на алгоритмах компьютерного зрения и способны распознавать товары по их внешнему виду. Автоматическое сканирование позволяет быстро и точно идентифицировать товары, не требуя дополнительных усилий со стороны персонала склада.

Заключение

При выборе технологии нужно ориентироваться на особенности работы склада и объемы товарооборота. Внедрение системы штрихкодирования потребует меньших финансовых вложений, зато RFID-технология дает больше возможностей, кратно превосходящую производительность, но снижает точность распознавания. На практике RFID-технология экономически оправдана только в случае, если все товары уже приходят на склад маркированными, т. е. RFID используется от производства до продажи, склад лишь встраивается в существующую технологическую цепочку. Но в силу дополнительных ограничений и слабых сторон этой технологии реально работающих примеров на широком рынке практически нет.

Список источников

1. *Волгин В.* Склад. Стандарты управления. 2013. С. 435.

2. Comparative study between RFID and barcode identification in warehouses / C. M. Scurtu, A. Vilceanu, A. Giurca, R. F. Radu // 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.

УДК 004.056; 519.812 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-63-65**

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

АНАЛИЗ РИСКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ОТКРЫТОГО ИСХОДНОГО КОДА

Рассмотрены вопросы возникновения рисков информационной безопасности при использовании открытого исходного программного кода в программных приложениях. Проведен анализ статистических данных по уязвимостям программного обеспечения в различных отраслях деятельности предприятий. Оценены возможные по подходы к снижению вероятности возникновения рисков от использования программного кода сторонних производителей.
Ключевые слова: *открытый программный код, риски информационной безопасности, комплексные системы защиты информации.*

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

RISK ANALYSIS OF USING OPEN SOURCE SOURCES

The issues of information security risks arising when using open source software code in software applications are considered. An analysis of statistical data on software vulnerabilities in various sectors of enterprise activity was carried out. Possible approaches to reduce the likelihood of risks arising from the use of third-party software code have been assessed.
Keywords: *open source code, information security risks, integrated information security systems.*

Современные тенденции ускорения разработки систем, в том числе написания программного кода, неизбежно приводят к использованию источников открытого кода при разработке программного обеспечения [1]. Такая организация работы над программным кодом приводит к росту уязвимостей программного обеспечения и, как следствие, к необходимости тщательного анализа используемого открытого исходного кода.

Согласно данным компании *Synopsys* [2], по итогам 2022 г., 87 % баз программного кода содержат уязвимости информационной безопасности, причем почти у половины при этом уязвимости являются критическими (рис. 1).

Несмотря на то, что профилактика уязвимостей для компании на практике является менее затратной, чем устранение последствий реализации угроз, большинство предприятий пренебрегают такими функциями. Ускорение создания программного кода происходит за счет и в ущерб его безопасности. Очевидно, что использование открытого программного кода создает менее формализованный продукт, не подчиняющийся техническим правилам и нормам, однако более гибкий и востребованный. За последние пять лет многократно увеличилась частота возникновения уязвимостей в про-

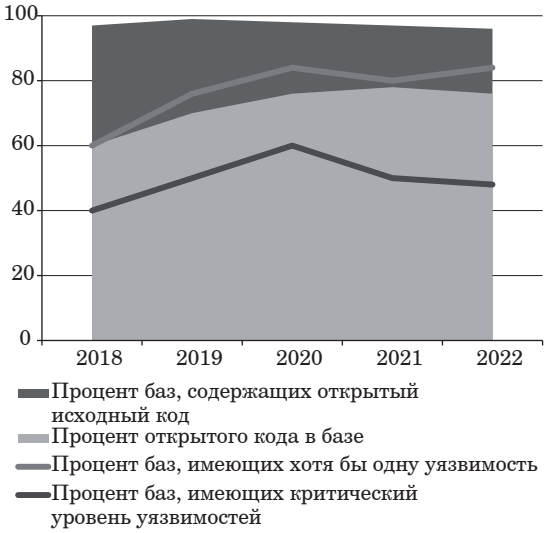


Рис. 1. Данные по содержанию уязвимостей в программном коде

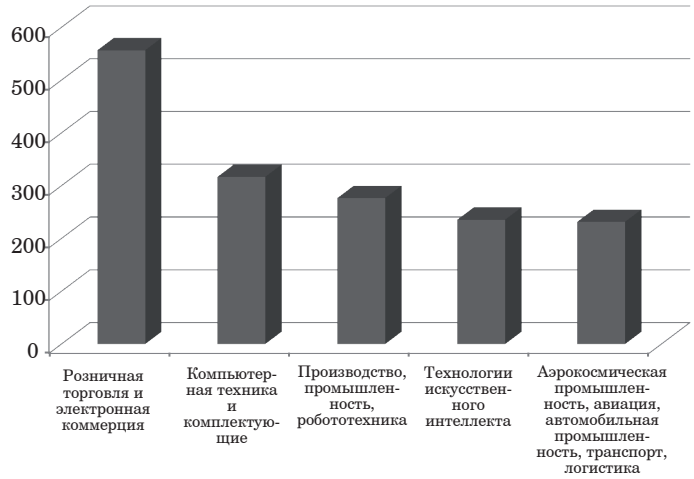


Рис. 2. Данные по росту числа уязвимостей за пять лет по отраслям, %

граммных приложениях в различных отраслях (рис. 2).

Частота возникновения уязвимостей высокого риска во всех представленных отраслях растет, но с разной скоростью. Самый низкий рост с 2018 г. зафиксирован в секторе маркетинговых технологий (около 42 %), а высокий – около 550 % – в розничной торговле и секторе электронной коммерции, что является поводом для принятия мер по его снижению.

Основными критериями оценки уязвимости являются вероятность ее возникновения и сумма ущерба от ее воздействия. В отраслях аэрокосмической промышленности и логистики (рис. 2) основная часть программного кода, встроенного в приложения, функционирует в закрытых информационных системах, что может снизить вероятность возникновения уязвимостей и, следовательно, потребность в их исправлении будет неактуальной. Кроме того, некоторые уязвимости можно устранить другими способами, которые не обязательно предполагают обновление компонентов программного кода. Если рассматривать процесс эксплуатации программного обеспечения в этих отраслях, можно обнаружить иные пути возникновения уязвимостей. Программное обеспечение в этих отраслях часто используется для функционирования микропроцессорных устройств, не имеющих доступа к сети передачи данных, в которой функции тематического обновления являются источником уязвимостей с высоким уровнем риска. Кроме того, программное обеспечение в этих отраслях имеет высокую степень формализации и стандартизации, что также снижает вероятность возникновения уязвимостей.

В отрасли Интернета вещей (IoT), наоборот, практически все базы программного обеспечения содержат открытый исходный код. Интернет вещей представляет собой яркий пример отрасли, в которой преимущества открытого исходного кода очевидны, так как сама отрасль настолько быстро развивается, что постоянное появление новых интеллектуальных устройств требует для них быстрого создания нового программного обеспечения. Кроме того, в отрасли с сильной конкуренцией открытый исходный код позволяет организациям быстро выходить на рынок и развиваться, без открытого исходного кода было бы невозможно угнаться за высокими темпами разработки. Однако недостатком такого развития является наличие уязвимостей, количество которых увеличилось на 130 % с 2018 г., и около половины приложений содержат уязвимости высокого риска, что является одним из самых высоких показателей. Эти уязвимости приобретают особую важность, так как направлены на нарушение информационной безопасности личности человека.

В идеале разработчики должны выбирать компоненты с открытым исходным кодом, поддерживаемые надежными компаниями, например, *Linux*, который дорабатывается каждый день тысячами разработчиков из сотен организаций. Однако на практике проекты с открытым исходным кодом являются продуктом неопределенного числа участников и сопровождающих, такая совместная работа снижает стимул для участников выполнять действия по ее сопровождению. Учитывая рост числа уязвимостей программного обеспечения, можно сказать, что основным критерием использования открытого кода должен быть уровень доверия

к используемому программному обеспечению и команде разработчиков.

При использовании коммерческого программного обеспечения организации не нужно беспокоиться о мониторинге обновлений, так как исправления и обновления устанавливаются автоматически. Использование же открытого исходного кода подразумевает ответственность пользователя за контроль безопасности и стабильности компонента, а также поиск новых версий и исправлений для компонентов по мере их появления.

Для принятия решения об использовании открытого программного кода, необходимо понимать, что субъект угрозы информационной безопасности стремиться достичь цели, не взирая на средства. Не имея уверенности в том, что используемое в организации программное обеспечение безопасно, нужно предполагать высокий риск возникновения инцидентов. На сегодняшний день практически не осталось организаций, которые бы не использовали в своей деятельности программное обеспечение, поэтому принятие решения о собственной разработке, использовании коммерческого или открытого программного обеспечения является важным вопросом в стратегии обеспечения информационной безопасности бизнеса.

При минимизации уязвимостей программного обеспечения предпочтительно использовать концепцию Software Bill of Materials (SBOM) [3], разработанную для производства продукции, где классическая спецификация материалов представляет собой перечень с подробным описанием всех элементов, входящих в продукт. При обнаружении дефектной детали производитель знает, какой из его продуктов поврежден, и может произвести его ремонт или замену. Аналогичным образом поддержание точной и актуальной концепции SBOM, в которой описываются компоненты с открытым исходным кодом, необходимо для обеспечения высокого качества, соответствия требованиям и безопасности кода. Как и в производстве, набор компонентов с открытым исходным кодом позволяет быстро определить элементы, подверженные риску, и соответствующим образом расставить приоритеты для устранения уязвимостей. Полный реестр SBOM содержит список всех компонентов с открытым исходным кодом в используемых организацией приложениях, а также лицензии, версии и статуса исправлений этих компонентов.

Цель технологии SBOM состоит в сопровождении процессов использования открытого программного кода сторонних разработчиков, обеспечении «прозрачности» компонентов программных приложений и стандартизации способа передачи этой информации. Данная технология позволяет идентифицировать компоненты с открытым исходным кодом по их происхождению, а затем сопоставлять эти компоненты с данными об уязвимостях. Эффективное управление открытым исходным кодом позволит улучшить концепцию информационной безопасности бизнеса [4].

В современном мире, где более 90 % коммерческого кода содержит открытый исходный код, мониторинг компонентов, используемых в программных приложениях, должен стать базовым требованием для программы DevSecOps любой организации.

Список источников

1. *Мыльников В. А.* Автоматизация процессов поиска уязвимостей в исходном коде на этапе разработки программного приложения // Завалишинские чтения – 23: сб. докл. XVIII Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике. СПб.: ГУАП, 2023. С. 51–54.

2. Open source security and risk analysis report // электронный ресурс. URL: https://www.synopsys.com/content/dam/synopsys/sig-assets/reports/rep-ossra-2023.pdf/ (дата обращения: 10.12.2023).

3. *Allen T., Zeman T.* Software Bill of Materials (SBOM) Basics. URL: https://foresite.com/blog/software-bill-of-materials-sbom-basics/ (дата обращения: 10.12.2023).

4. *Мыльников В. А., Елина Т. Н.* Проектирование архитектуры информационной системы мониторинга уязвимостей при разработке программного обеспечения // Завалишинские чтения – 23: сб. докл. XVIII Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике. СПб.: ГУАП, 2023. С. 55–59.

УДК 004.056; 519.812 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-66-68**

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

ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены процессы предметно-ориентированного проектирования информационных систем, а также связанные с ними вопросы обеспечения надежности и безопасности информации. Проведен анализ использования системы «1С: Предприятие» для автоматизации учетных процессов в различных предметных областях. Рассмотрены механизмы реализации идентификации и аутентификации пользователей предметно-ориентированной информационной системы.
Ключевые слова: *информационная безопасность, предметно-ориентированные информационные системы, проектирование, аутентификация.*

V. A. Myl'nikov*
PhD, Tech., Associate Professor
T. N. Yelina*
PhD, Economic, Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ISSUES OF ENSURING INFORMATION SECURITY AND RELIABILITY OF DOMAIN-SPECIFIC SYSTEMS

The processes of subject-oriented design of information systems, as well as related issues of ensuring the reliability and security of information, are considered. An analysis of the use of the «1C: Enterprise» system for automating accounting processes in various subject areas was carried out. The mechanisms for implementing identification and authentication of users of a domain-oriented information system are considered.
Keywords: *information security, domain-specific information systems, design, authentication.*

Для разработки автоматизированных информационных систем различных объектов, деятельность которых относится к конкретной предметной области, используются принципы, методы и модели предметно-ориентированного проектирования [1]. Оно основано на программных абстракциях – моделях предметной области, которые отражают бизнес-логику объекта с целью установления связи между процессами конкретной предметной области и программным кодом приложения. Основной идеей использования предметно-ориентированного проектирования является создание качественной информационной модели, максимально отражающей автоматизируемые бизнес-процессы рассматриваемой предметной области.

При разработке информационной системы необходимо исследовать процессы предметной области конкретного предприятия, а не обобщенные процессы. Во всей предметной области необходимо выделить подобласть, в которую входят анализируемые бизнес-процессы, это обосновано тем, что моделирование всей предметной области невозможно из-за слишком сложной ее структуры и наличия большого количества связей между элементами. В выделенных подсистемах необходимо определить приоритетное направления автоматизации, называемое смысловым ядром, которое характеризует основное направление деятельности всего предприятия. Очевидно, что основные проекты по автоматизации должны быть направлены на смысловое ядро. Остальные подобласти, не относящиеся к смысловому ядру, являются служебными.

Всю моделируемую предметную область можно логически разделить на две части: пространство задач и пространство решений. Первая подобласть определяет некоторую проблему, требующую решения в виде автоматизации

процессов. Вторая подобласть показывает, какими средствами будет достигаться решение поставленной задачи. В пространство задач включается смысловое ядро, а также служебные подобласти, которые это ядро использует. А пространство решений включает в себя набор конкретных моделей смыслового ядра и служебных подобластей, причет для каждой области разрабатывается свой ограниченный контекст, позволяющий объединить пространство задач и пространство решений. Если архитектура программы или хотя бы некая ее центральная часть не соответствует структуре модели предметной области, то такая модель практически бесполезна, и правильность работы программы тоже нужно поставить под сомнение. По результатам анализа предметной области можно сформулировать основные требования к разрабатываемой информационной системе.

Далее строится модель данных. Для этого в условиях определенного ограниченного контекста могут быть использованы тактические шаблоны, примерами которых выступают сущность, объект-значение, службы предметной области, события, модули, агрегаты, фабрики и хранилища [2]. В результате моделирования предметной области определяются основные процессы, подлежащие автоматизации. Одной из ключевых особенностей данных процессов является их учетная направленность, причем характер учета может быть любой: это может быть учет сырья и материалов, работ и услуг, клиентов и продаж, оборудования, программного обеспечения и т. д.

Для автоматизации учетных процессов предприятия в настоящее время наиболее подходящей средой является система «1С: Предприятие». По требованию российского законодательства [3] все операторы персональных данных обязаны выполнить ряд требований по их защите и хранению. Конфигурации, разработанные на платформе «1С: Предприятие 8.2» и выше, могут быть использованы при создании информационной системы персональных данных любого класса, и дополнительная сертификация прикладных решений не требуется, так как специальные версии технологической платформы сертифицированы по требованиям безопасности информации в системе сертификации Федеральной службы по техническому и экспортному контролю России.

Основным отличием предметно-ориентированной системы является ограниченный набор объектов, которые возможно использовать для автоматизации процессов предметной области. В системе «1С: Предприятие» данный набор объектов достаточен для автоматизации любых видов учета.

Использование информационных технологий в учетных процессах предприятия, даже для решения ограниченного числа задач, создает неоспоримые преимущества при выполнении сотрудниками своих должностных обязанностей, однако в тоже время, это приводит к возникновению ряда проблемных вопросов, связанных с обеспечением информационной безопасности. Среди проблемных вопросов в обеспечении информационной безопасности в информационных системах учета на предприятиях можно выделить следующие:

1) бессистемность защиты данных и слабая координация мер по защите информации, которые не позволяют обеспечить должный уровень защиты информации;

2) устаревание версий операционных систем, программных продуктов, используемых в рамках учета эксплуатации транспортных средств, что увеличивает риск заражения вредоносным программным обеспечением, а также облегчает несанкционированный доступ к данным пользователя;

3) отставание отечественных информационных технологий, что вынуждает прибегать к использованию импортной техники и программных продуктов, и повышает вероятность несанкционированного доступа к данным правоохранительных органов;

4) недостаточность законодательной базы, отсутствие точных определений, что не позволяет полноценно реализовывать действия существующих стандартов;

5) отсутствие научно-практических основ информационной безопасности в отрасли;

6) отсутствие критериев и методов оценки эффективности систем и средств информационной безопасности и их сертификации;

7) недостаточная квалификация сотрудников в вопросах информационных технологий, информационной безопасности и важности ее обеспечения;

8) отсутствие четкого регламента и порядка действий сотрудников при возникновении угроз информационной безопасности;

9) отсутствие либо недостаточность каких-либо механизмов резервного восстановления данных.

Данные вопросы требуют решения с помощью реализации в автоматизированной системе учета механизмов защиты информации.

Платформа «1С: Предприятие» обеспечивает разграничение и контроль доступа к данным. Механизм поддержки криптографии в системе

включает определенный состав объектов, с помощью которых обеспечивается возможность подключения и использования криптографических средств сторонних производителей. В разрабатываемых решениях существует возможность реализации различных способов аутентификации пользователей прикладных решений.

Для конкретного прикладного решения определяются пользователи с различными наборами прав, которые описываются в системе. Наборы могут отличаться между собой в зависимости от должности пользователя или от его вида деятельности. Права доступа могут настраиваться как на отдельные объекты, так и на записи или реквизиты в этих объектах.

Основные действия, совершаемые пользователем над прикладными объектами, можно разделить на четыре вида: чтение, добавление, изменение, удаление. При настройке ролей пользователей прикладного решения для указанных выше действий определяются ограничения доступа к данным, представляющие собой условия на данные прикладного объекта. Если ограничение доступа к данным принимает значение «Истина» при обращении пользователя к каком-то объекту, то запрошенное им действие может быть выполнено, иначе – выводится запрет (рисунок). Для того, чтобы разграничения прав доступа к данным работали, в прикладном решении необходимо установить механизм аутентификации пользователей. В системе «1С: Предприятие» можно выделить следующие виды аутентификации:

– OpenID Connect-аутентификация;

– OpenID-аутентификация;

– аутентификация средствами «1С: Предприятие»;

– аутентификация средствами операционной системы;

– механизмы двухфакторной аутентификации.

Для каждого пользователя необходимо указать хотя бы один из видов аутентификации, иначе вход в информационную базу будет для него невозможен.

Таким образом, применение методов предметно-ориентированного проектирования информационных систем является эффективным механизмом для автоматизации производственных процессов, связанных с учетной деятельностью. Наиболее распространенным средством автоматизации учетных бизнес-процессов является система «1С: Предприятие», имеющая множество преимуществ по сравнению с объектно-ориентированными системами в рамках создания прикладных программных средств в области организационного учета.

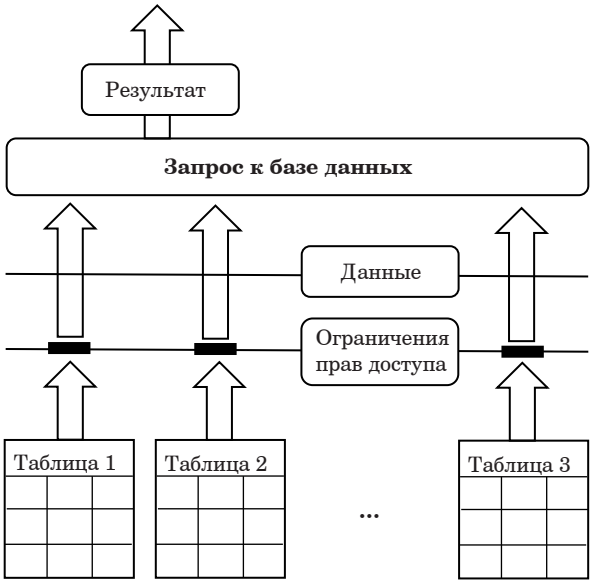


Схема работы ограничений на данные

Список источников

1. *Scott M., Nick T.* Patterns, principles, and practices of domain-driven design. Indianapolis: Wrox, 2015.

2. *Вернон В.* Реализация методов предметно-ориентированного проектирования. М.: Диалектика, 2023. 688 с.

3. Федеральный закон «О персональных данных» от 27.07.2006 № 152-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801/ (дата обращения: 21.01.2024).

4. *Селищев Н.* Администрирование системы «1С: Предприятие 8.2». М.: Питер, 2018. 400 с.

УДК 004.9.62.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-69-72**

С. Г. Фомичева*
кандидат технических наук, профессор
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ОПЕРАТИВНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ СЛОЖНЫХ ВИЗУАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрены архитектурные особенности современных моделей оперативной сегментации произвольных объектов сложной структуры при использовании протоколов нулевого кадра. Приведены результаты сравнительного анализа производительности и точности моделей оперативного сегментирования при видеомониторинге в системах контроля и управления доступом.
Ключевые слова: *компьютерное зрение, модели оперативного сегментирования, нулевой кадр, мониторинг видеопотока.*

S. G. Fomicheva*
PhD, Tech., Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ANALYSIS OF INTELLIGENT MODELS FOR OPERATIONAL SEGMENTATION AT COMPLEX VISUAL OBJECTS

The modern models architecture for operational segmentation at arbitrary objects of complex structure using zero-shot transfer are considered. The results of a comparative analysis of the performance and accuracy for operational segmentation models using video monitoring in access control and management systems are presented.
Keywords: *computer vision, segment anything models, zero-shot transfer, video stream monitoring.*

В состав современных систем динамического профилирования пользователей и сущностей входят модули интеллектуального распознавания объектов. При обеспечении информационной безопасности точная сегментация разнообразных объектов на изображениях имеет основополагающее значение. Кроме того, при принятии решений о наличии или отсутствии аномалий поведения часто требуется решать ряд предварительных задач [1–3], таких как понимание сцены событий безопасности, редактирование изображений/видео и аннотирование пользовательских обучающих наборов данных. Для данных целей эффективно используют интеллектуальные модели оперативного сегментирования Segment Anything Model (SAM), которые позволяют сегментировать любой объект на любом изображении, используя различные интерактивные подсказки для ввода (отзывы пользователя), включая фиксацию ключевых точек, ограничивающих рамок (b-boxes) и бинарных масок (binary masks).

Будучи предобученной более чем на одном миллиарде масок, SAM демонстрирует достаточно высокую производительность [4]. Однако ее способности прогнозировать маски часто имеет недостаточную точность, особенно когда речь идет об объектах сложной формы или выявлении меток отравления изображений в ходе анализа состязательных атак [3].

В данной работе проводятся результаты сравнительного анализа производительности и точности сегментирования SAM-модели и новой модернизированной ее версии – интерактивной модели сегментации Segment Anything in High Quality (HQ-SAM) [5] применительно к пользовательским датасетам. В ходе экспериментов использованы пользовательские датасеты, полученные при эксплуатации систем контроля и управления доступом (СКУД). В тестовых выборках также использовались данные точно аннотированного бенчмарка HQ-YTVIS [6]. В качестве интеллектуального инструмента для аннотирования изображений использовалась платформа Supervisely Ecosystem. Показано, что применение трансферного обучения позволяет добиться повышения метрик meanAP (mAP) и mBIoU [7] до приемлемого уровня при применении HQ-SAM в системах видеомониторинга, однако в режиме реального времени

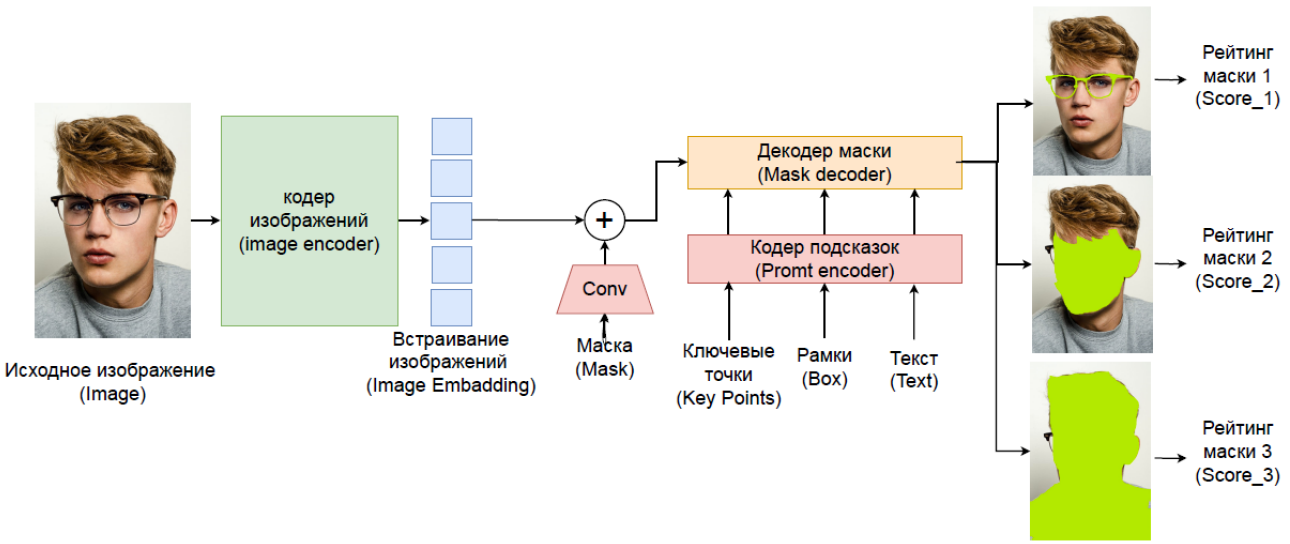
функциональность HQ-SAM требует усовершенствований.

Модель Segment Anything (SAM) – это базовая модель визуального представления для общей сегментации изображений, которая сегментирует широкий спектр объектов, частей и визуальных структур в различных сценариях, принимая в качестве входных данных подсказку (promt), состоящую из ориентировочных ключевых точек, ограничивающей рамки или грубой маски. Требование о допустимой маске вывода при сегментации означает, что даже если вербальный запрос на сегментацию или promt неоднозначен и может относиться к нескольким объектам (например, точка на очках может указывать либо на очки, либо на человека, который их носит), вывод сегментирующей маски должен быть осмысленной маской по крайней мере для одного из этих объектов (маска очков/маска лица).

Архитектура SAM включает кодер изображений (image encoder), кодер быстрых подсказок (promt encoder) и декодер масок (mask decoder) (рисунок). Основой кодеров и декодера являются модели Transformer vision [4, 5]. Для разрешения неоднозначности SAM предсказывает на выходе несколько масок для одной подсказки (по умолчанию выводится три маски: целое, часть, фрагмент части), позволяя SAM естественным образом справляться с двусмысленностью, например, «очки против человека». Чтобы ранжировать маски на выходе, модель предсказывает доверительный рейтинговый балл (score) для каждой маски с пороговым значением (по умолчанию равным 0,88). Избыточные маски удаляются с помощью механизма немаксимального подавления (NMS). Карты ребер вычисляются с использованием фильтра Собеля и стандартной облегченной постобработки, включая NMS-ребер.

Модель SAM способна работать в сценариях сегментации с «нулевым кадром» (Zero-shot transfer), когда она на входе получает изображения и прогнозирует маски для объектов без указания для них точного имени класса. Впервые эта модель была представлена исследовательской командой *Facebook* и обучена на датасете SA-1B, включавшем в себя миллиарды аннотированных изображений с высоким разрешением (на одном изображении могут присутствовать свыше 200 масок). Однако общая производительность SAM не соответствует показателям *реального* времени при использовании мощного кодировщика изображений, присущих системам видео мониторинга при обеспечении информационной безопасности.

В отличие от SAM, модель HQ-SAM (являясь расширением исходной модели Segment Anything) прогнозирует более точную сегментацию объектов за счет повторного использования предварительно обученных весов модели SAM, вводя минимальные дополнительные параметры (дополнительный высокоточный токен – HQ-Output Token) и функционал слияния глобальных и локальных признаков (HQFeatures)) в декодер маски SAM. HQ-SAM была разработана в ETH Zürich (VIS Group). Мы собрали свой набор данных из мелкозернистых масок разме-



Архитектура SAM

Значения индексов Mean Boundary IoU (mBIoU) при трансферном обучении SAM и HQ-SAM на пользовательском датасете

Количество точек на нулевом кадре	mBIoU (SAM)	mBIoU (HQ-SAM)	mBIoU (SAM)	mBIoU (HQ-SAM)	mBIoU (SAM)	mBIoU (HQ-SAM)
	Без трансферного обучения (baseline)		Двухкаскадное обучение SAM+HQ-SAM		Прямое трансферное обучение HQ-SAM	
1	28,2	35,9	38,2	49,1	**58,2**	**59**
3	57,3	60,1	65,3	67,1	**75,3**	**77,1**
5	68,2	68,5	70,7	71,5	**80,2**	**81,5**
10	72,4	76,1	73,3	79,1	**82,4**	**86,1**
15	74,9	78,4	80,9	82,7	**84,9**	**88**
20	75,3	79,2	81,3	85,9	**85,3**	**89,2**

ром 44 КБ из нескольких источников и обучили модель всего за 4 ч на восьми графических процессорах. Модель HQ-SAM продемонстрировала свою эффективность на девяти различных наборах данных сегментации для различных задач, причем семь из них оценивались в протоколе нулевой передачи. При этом модель HQ-SAM имеет сопоставимую скорость вывода. Модель HQ-SAM создает более точные маски с тем же количеством по сравнению с SAM по умолчанию, согласно всесторонней оценке тестов [5].

При обработке пользовательских датасетов, полученных в ходе эксплуатации СКУД-систем, нами было обнаружено, что модель SAM в целом на видеопотоках с точки зрения качества масок работает хорошо, но точная сегментация некоторых объектов (например, специфические особенности очков на лицах) требует улучшения. Кроме того, выяснилось, что данная модель очень чувствительна к расположению ключевых точек, что критически важно при аутентификации и (или) распознавании пользователей.

Поскольку для обучения точной сегментации требуется набор данных с точными аннотациями масок различных объектов со сложной и детализированной геометрией, потребовалось в ходе экспериментов исследовались два подхода:

1) двухкаскадное трансферное обучение (техника уточнения – Fine-tuning);

2) прямое дообучение HQ-SAM модели по протоколу нулевого кадра.

При двухкаскадном трансферном обучении первоначально было на пользовательском датасете проведено обучение SAM-модели, метрики качества обучения которой приведены в таблице. После чего замораживалась предварительно обученная SAM-модель, и производилось дообучение модели HQ-SAM, в результате чего получены метрики mBIoU, также причведенные в таблице.

При прямом дообучении HQ-SAM модели (предобученной на датасете HQSeg-44K, содержащем более 1000 разных семантических классов) непосредственно на входе использовался пользовательский датасет. Поскольку модель предназначена для гибких подсказок сегментации, дообучение HQ-SAM проводилось путем выборки смешанных типов подсказок, включая ограничивающие рамки, произвольно выбранные ключевые точки и грубые маски. Для этого грубые маски синтетически генерировались добавлением случайного гауссовского шума в граничные области.

Дообучение проводилось при начальной скорости обучения 0,001 в течение 12 эпох.

В итоге получено, что второй подход при прямом использовании HQ-SAM с протоколом нулевого кадра имеет следующие преимущества:

1) значительно улучшается качество выходных масок объектов на видеокадрах при существенном ускорении обучения HQ-SAM – модели по времени и чрезвычайной эффективности по объему обучающих данных. Разрыв в производительности при строгих пороговых значениях индексов Жаккара (mIoU и mBIoU) пользовательского датасета явно подтверждает преимущество HQ-SAM в прогнозировании очень точных масок (таблица). И даже при слабом пороговом значении mBIoU около 0,5 модели HQ-SAM сокращает количество неверных прогнозов на 75%, т. е. HQ-SAM прогнозы не только существенно более точны, но и более надежны в сложных случаях;

2) поскольку обученный в структуре HQ-SAM высокоточный токен HQ-Output Token и соответствующие MLP-слои не перестраиваются для маскировки смещения аннотаций конкретного набора данных, то сохраняется высокая способность модели к сегментации с нуле-

вым кадром на новых изображениях без катастрофического забывания.

Однако, хотя HQ-SAM значительно повышает качество выходных масок SAM при незначительных накладных расходах, использование в архитектуре мощного ViT-кодера SAM не позволяет достичь скорости обработки видео в реальном времени. Это обосновывает необходимость проведения дальнейших исследований при использовании применения механизма HQ-Output Token в детекторах обнаружения объектов семейства YOLOv8, где функционал слияния глобальных и локальных (HQFeatures) изначально заложен в архитектуру [8].

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».

Список источников

1. *Фомичева С. Г.* Функциональные особенности SIEM-решений нового поколения // Завалишинские чтения – 21. XVI Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике. СПб.: ГУАП, 2021. С. 327–333.

2. *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.

3. *Фомичева С. Г.* Теоретические аспекты квантования баз знаний в мультиагентных системах // Информационно-управляющие системы. 2017. № 88 (3). С. 2–10. Doi: 10.15217/issnl6848853.2017.3.2.

4. Segment anything / A. Kirillov [et al.]. 2023. URL: https://arxiv.org/abs/2304.02643 (дата обращения: 14.12.2023).

5. Segment anything in high quality / L. Ke [et al.]. URL: https://arxiv.org/abs/2306.01567 (дата обращения: 14.12.2023).

6. Video mask transfiner for high-quality video instance segmentation / L. Ke [et al.] // ECCV. 2022. URL: https://www.ecva.net/papers/eccv_2022/papers_ECCV/papers/136880721.pdf (дата обращения 14.12.2023).

7. Boundary IoU: Improving object-centric image segmentation evaluation / B. Cheng [et al.] // CVPR. 2021. URL: https://arxiv.org/pdf/2103.16562.pdf (дата обращения: 14.12.2023).

8. *Fomicheva S., Bezzateev S.* Modification of the Berlekamp – Massey algorithm for explicable knowledge extraction by SIEM-agents. J. phys.: conf. 2022. Ser.: 2373 052033. Doi:10.1088/1742-6596/2373/5/052033. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2373/5/052033 (дата обращения: 14.12.2023).

УДК 004.9.62.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-73-77**

С. Г. Фомичева*
кандидат технических наук, профессор
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОТСЛЕЖИВАНИЕ ЦЕЛЕВЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗАДАЧАХ ВИДЕОМОНИТОРИНГА

Рассмотрены модели машинного обучения, поддерживающие функционал видеомониторинга в системах безопасности и способные к обучению и самообучению в режиме реального времени. Проанализированы функциональность современных классово независимых моделей сегментации видеообъектов и их возможности применения при отслеживании целевых объектов при динамическом профилировании пользователей.
Ключевые слова: *отслеживание объектов, модели сегментирования видео, отслеживание масок, нулевой кадр, мониторинг видеопотока.*

S. G. Fomicheva*
PhD, Tech., Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

TRACKING TARGETS IN VIDEO MONITORING TASKS

Machine learning models supporting the functionality of video monitoring in security systems and capable of learning and self-learning in real time are considered. The functionality of modern class-independent segmentation models of video objects and their application possibilities in tracking target objects during dynamic user profiling are analyzed.
Keywords: *object tracking, video segmentation models, mask tracking, zero frame, stream monitoring.*

Системы обеспечении информационной безопасности часто включают в свой состав подсистемы видеомониторинга с поддержкой искусственного интеллекта (AI) [1, 2]. При захвате ими в область интереса некоторого целевого объекта требуется решать задачу его отслеживания. Отслеживание объектов – это фундаментальная задача компьютерного зрения, целью которой является прогнозирование положения заданного целевого объекта в каждом видеокадре. Модели машинного обучения (ML-модели), поддерживающие функционал видеомониторинга в системах безопасности, должны обладать способностью обучения и самообучения в режиме реального времени. Дополнительные трудности возникают в задачах выявления аномального поведения при динамическом профилировании пользователей в связи с потенциально неограниченным числом классов целевых объектов. В данной статье анализируется функциональность ML-моделей, относящихся к типу Segment Anything Model (SAM) [3], на способность их применения при отслеживании целевых объектов в режимах реального времени.

На сегодняшний день задачу отслеживания объектов принято подразделять на следующие составляющие:

1) отслеживание отдельного объекта (single object tracking, SOT);

2) отслеживание нескольких объектов (multi-object tracking, MOT);

3) полуконтролируемое независимое от класса отслеживание нескольких объектов;

4) сегментация видеообъектов (video object segmentation, VOS).

При отслеживании отдельных объектов выполняют локализацию одного объекта на всех видеокадрах на основе ручной аннотации, предоставленной для первого кадра. Аннотатор помечает целевой объект ограничивающей рамкой в первом кадре, а затем ML-модель находит объект в следующих кадрах. При этом аннотация целевого объекта часто называется template, а на следующих кадрах – search area. ML-модели из этой категории обучены отслеживать любой объект по аннотации на первом кадре, поэтому называются классово. Их можно использовать непосредственно внутри инструмента аннотирования видео для ускорения

маркировки вручную за счет автоматического отслеживания любого объекта. Однако при реализации атак аномальные целевые объекты часто взаимодействуют в группе, следовательно, возникает необходимость одновременного отслеживания нескольких классов целевых объектов в одном видео потоке.

При отслеживании нескольких объектов выполняется автоматическое обнаружение объектов заданного набора классов и оценки их траекторий на видео. Это означает, что такие модели должны быть обучены обнаруживать и отслеживать только определенный набор классов. На сегодняшний день существующие ML-модели категории MOT, во-первых, не способны функционировать в реальном времени, во-вторых, в процессе мониторинга нет возможности предоставить пользователю обратную связь или корректировать модель. Основное их применение – поддержка автоматического интеллектуального аннотирования видео в режиме off-line.

Если же первоначально применить модель SOT к каждому объекту в первом кадре и позволить корректировать прогнозы отслеживания и повторно отслеживать объекты с помощью ML-моделей с подкреплением, то в результате можно получить полуконтролируемое независимое от класса отслеживание нескольких объектов [4, 5]. Таким образом, пользователь одновременно может добиться высокой скорости аннотирования с помощью AI и иметь полный контроль над качеством маркировки. Поскольку информация должна передаваться из аннотации нулевого (первого) кадра в другие видеокадры, большинство методов VOS используют функциональную память с глубокой структурой для хранения соответствующих представлений объекта. Современные методы VOS базируются на архитектуре трасформеров и используют механизм внимания (Attention mechanism) [6] для связывания представлений прошлых кадров, хранящихся в памяти объектов, с объектами, извлеченными из недавно наблюдаемого фрейма запроса, который необходимо сегментировать. Несмотря на высокую производительность этих методов, они требуют большого объема памяти графического процессора для хранения прошлых представлений кадров. На практике они обычно с трудом справляются с обработкой видео продолжительностью более одной минуты. Совершенствование их архитектурных особенностей потенциально способно привести к желаемому результату.

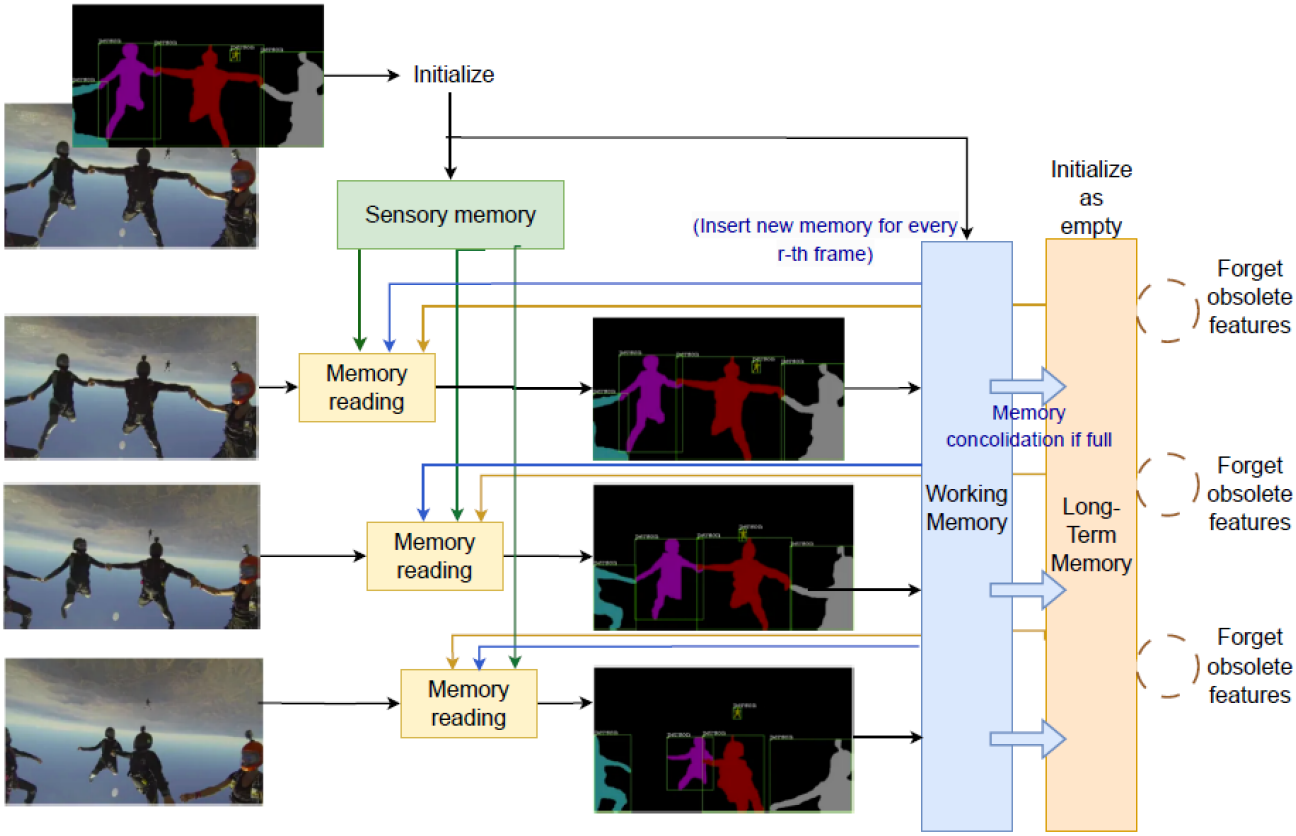
Сегментация видеообъектов аналогична отслеживанию отдельных объектов, но используются для аннотирования вместо ограничивающих рамок маски сегментации [5–7]. Обычно аннотатор должен пометить маску объекта на первом кадре, а затем модель будет сегментировать и отслеживать целевой объект на других кадрах видео. С точки зрения применения при обеспечении безопасности, VOS-модели остро актуальны при разборах инцидентов, где должны быть подтверждены/опровергнуты факты соприкосновений, передачи предметов, пересечения контролируемых зон и т. п.

Наиболее эффективной ML-моделью для сегментации видеообъектов в рассматриваемых задачах является нейронная сеть XMem [6], которая доступна по ссылке https://hkchengrex.github.io/XMem и не зависит от класса объекта и может отслеживать маски для любых объектов. Модель может «запоминать» объект и продолжать его сегментировать даже после того, как объект на некоторое время покинет видеосцену. Она также хорошо справляется со сложными сценами с окклюзиями объектов и изменениями их формы и вида. Архитектура XMem показана на рисунке.

В отличие от полуконтролируемого отслеживания, где используется один тип функциональной памяти, XMem поддерживает три независимых, но глубоко связанных типа памяти для хранилища функций: быстро обновляемую сенсорную память (Sensory memory), рабочую память с высоким разрешением (Working memory) и компактную, устойчивую долговременную память (Long-term memory). XMem хранит в долговременной памяти набор очень компактных прототипов объекта. Алгоритм консолидации памяти выбирает репрезентативные прототипы из рабочей памяти, а алгоритм потенцирования памяти превращает эти прототипы в компактное, но мощное представление для долговременного хранения в памяти.

Для оценки производительности и качества XMem используют наборы длинных видеоданных, такие как STCN (которые обычно содержат более 7000 кадров), и более коротких – YouTubeVOS, DAVIS, которые дополняются в процессе обучения синтетическими фреймами в ходе аугментации.

Датасет DAVIS-2017 содержит 30 тестовых видеорядов с аннотациями на уровне экземпляра, YouTube-VOS 2018 г. включает в себя 474 видеоряда, а версия 2019 г. расширена до 507 видеороликов с большим количеством аннотаций. Среди этих сэмплов YouTube-VOS присутствует как один целевой объект, так и несколько целевых объектов для сегментации. По сравнению с DAVIS-2017, сэмплы из YouTube-VOS более



Архитектура XMem

сложны с точки зрения сцен. Кроме того, в датасетах YouTube-VOS в каждом видео предоставляется аннотация только к нулевому (первому) кадру целевых объектов.

Метрики качества и производительности XMem по сравнению с иными современными VOS-моделями при аннотировании только нулевого кадра весьма впечатляющие (таблица). Для оценки качества используется стандартный протокол: вычисляется индекс Жаккара (J), который измеряет сходство регионов (рамок); метрика F указывает на точность контура, а $J\&F$ является их средним значением.

Однако сеть XMem для отслеживания масок иногда дает сбой, когда целевой объект движется слишком быстро или имеет сильное размытие при движении, так что даже сенсорная память – самый быстрый блок памяти в архитектуре модели не может успевать за быстрыми изменениями объектов. Кроме того, одним из дополнительных случаев сбоя является быстрое движение похожих объектов, которые не дают достаточных подсказок о внешнем виде для отслеживания XMem. Межкадровая и внутрикадровая избыточность, с одной стороны, повышает качество сегментирования, но, с другой, затрудняет формирование эффективного шаблона соответствия кадров.

Потенциально создать VOS-систему в реальном времени можно на базе модели SWEM (Lin et al., 2022) [7], использующую механизм взвешенного максимального внимания (Weighted Expectation-Maximization Attention, WEMA) при построении набора репрезентативных прототипов аннотации низкого ранга (для функций памяти), что позволяет рассматривать более компактные представления прототипов и значительно снижает время на обработку внутрикадровой избыточности. Более того, SWEM использует взвешенный WEMA с адаптивными весами, которые имеют больший вес для гарантированных прототипов. Это говорит о возможности к переходу от нейросетевых (необъясняемых) моделей к нейронечетким (объясняемым и частично объясняемым) моделям, что принципиально важно при обеспечении информационной безопасности с точки зрения наличия доказуемости сформированных решений ML-моделью. Использование нейро-нечетких структур при формировании функций внутри-

Значения метрик качества и производительности для современных VOS-моделей

ML-модель	YouTube-VOS, %			DAVIS-2017, %			Время, секунд на кадр
	J&F	*J*	*F*	*J&F*	*J*	*F*	
LCM (Hu et al., 2021)	81,2	86,7	75,7	83,5	80,5	86,5	0,12
HMMN (Seong et al., 2021)	84,6	82,1	87,0	84,7	81,9	87,5	0,10
SWEM (Lin et al., 2022)	84,7	82,4	86,9	**84,3**	**81,2**	**87,4**	**0,04**
STCN (Cheng, Tai and Tang, 2021)	84,2	81,9	86,5	85,4	82,2	88,6	0,06
AOT-L (Yang, Wei, Yang, 2021)	85,0	82,5	87,5	83,0	80,3	85,7	0,13
JOINT (Mao et al., 2021)	83,7	81,5	85,9	83,5	80,8	86,2	0,10
XMem (Cheng, Schwing, 2022)	**87,5**	**85,1**	**89,8**	82,5	79,1	85,8	0,39

кадровых и межкадровых зависимостей рассмотрено автором данной статьи в [8, 9].

Следует отметить, что SWEM эффективно справляется с внутрикадровой избыточностью, однако проблема межкадровой избыточности остается нерешенной. А именно: применение WEMA к одному кадру эффективно, но сложность вычислений значительно возрастет, если его напрямую применять ко всем растущим функциям памяти. Чтобы уменьшить межкадровую избыточность, SWEM использует последовательную максимизацию взвешенного математического ожидания (Sequential Weighted Expectation-Maximization, SEM), при которой элементы только одного кадра участвуют в итерациях WEMA на этапе обновления памяти. То есть память обновляется с помощью новых функций фрейма за счет сходства, а не простой линейной комбинации. Формально этот процесс обновления эквивалентен средневзвешенному значению всех прошлых характеристик кадра. Однако, по сравнению с STM [10], которая сохраняет всю историческую информацию о кадрах в качестве шаблона памяти объектов, SWIM последовательно обновляет только более компактный набор прототипов, тем самым значительно уменьшает межкадровую и внутрикадровую избыточность.

В итоге, для формирования VOS-систем реального времени, действительно пригодных для динамического профилирования, потребуется дальнейшая синергия идей, заложенных в SWIM- и XMem-моделях, при использовании XAI-подходов на базе нейронечетких структур.

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».

Список источников

1. *Фомичева С. Г.* Функциональные особенности SIEM-решений нового поколения // Завалишинские чтения – 21: XVI Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике. СПб.: ГУАП, 2021. С. 327–333. Doi: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-327-333.

2. *Беззатеев С. В., Фомичева С. Г., Супрун А. Ф.* Повышение эффективности мультиагентных систем информационной безопасности методами постквантовой криптографии // Проблемы информац. безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 4. С. 71–88. Doi: 10.48612/jisp/75dp-p3ed-hrmk.

3. Segment anything / A. Kirillov [et al.]. URL: https://arxiv.org/abs/2304.02643 (дата обращения: 14.10.2023).

4. *Duarte K., Rawa Y. S. , Shah M.* Capsulevos: Semi-supervised video object segmentation using capsule routing» // ICCV. 2019. Doi: https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.00132.

5. Video object segmentation with dynamic memory networks and adaptive object alignment / S. Liang, X. Shen, J. Huang, X.-S. Hua // IEEE/CVF International conference on computer vision (ICCV) (Montreal, QC, Canada, 2021). 2021. P. 8045–8054. Doi: 10.1109/ICCV48922.2021.00796.

6. *Cheng H. K., Schwing A. G.* XMem: long-term video object segmentation with an atkinson-shiffrin

memory model. 2022. Doi: https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.07115.

7. SWEM: Towards real-time video object segmentation with sequential weighted expectation-maximization / L. Zhihui [et al.]. 2022. URL: https://openaccess.thecvf.com/content/ CVPR2022/papers/Lin_SWEM_Towards_RealTime_Video_Object_Segmentation_With_Sequential_Weighted_Expectation-Maximization_CVPR_2022_paper.pdf (дата обращения: 14.10.2023)

8. *Фомичева С. Г.* Теоретические аспекты квантования баз знаний в мультиагентных системах // Информационно-управляющие системы. 2017. № 88 (3). С. 2–10. Doi: 10.15217/issnl6848853.2017.3.2.

9. *Fomicheva S., Bezzateev S.* Modification of the Berlekamp – Massey algorithm for explicable knowledge extraction by SIEM-agents // J. phys.: conf. 2022. Doi:10.1088/1742-6596/2373/5/052033. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2373/5/052033 (дата обращения: 14.12.2023).

10. Video object segmentation using space-time memory networks / Seoung Wug Oh [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF International conference on computer vision (ICCV). 2019. October. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2019/papers/Oh_Video_Object_Segmentation_Using_Space-Time_Memory_Networks_ICCV_2019_paper.pdf (дата обращения: 14.10.2023).

УДК 004.434 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-78-81**

С. Г. Фомичева*
кандидат технических наук, профессор
Д. В. Карапугина*
студент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ ДИСКРЕТНЫХ TPM ЗАРУБЕЖНЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ

Приведен сравнительный анализ функциональности дискретных модулей доверенных платформ актуальных на данный момент зарубежных реализаций в контексте обеспечения безопасности всех этапов жизненного цикла программного кода.
Ключевые слова: *доверенная платформа, дискретный модуль доверенной платформы, защита программного кода, регистры конфигурации платформы.*

S. G. Fomicheva*
PhD, Tech., Professor
D. V. Karapugina*
Student
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ANALYSIS OF THE FOREIGN DISCRETE TPM IMPLEMENTATIONS

A comparative analysis of the discrete modules functionality for trusted platforms of currently relevant foreign implementations is given. Analysis in the context of ensuring the security for all stages of the life cycle program code is given.
Keywords: *trusted platform, discrete trusted platform module, program code safety, platform configuration registers*

В современном мире разработка программного обеспечения играет огромную роль, а разработчикам необходимо защищать код на протяжении всей его жизни, так как он является интеллектуальной собственностью. Нарушение конфиденциальности или несанкционированное использование могут принести не только убытки компании или разработчику, но и обычным пользователям. Поэтому важно защищать код на всех этапах жизненного цикла, т. е. не только во время проектирования и хранения, но и во время выполнения.

В данной статье анализируются механизмы защиты программного кода во время его хранения, разворачивания и эксплуатации (выполнения) на базе концепций Trusted Platform Module (TPM) [1].

На данный момент существует достаточно много реализаций доверенных платформ с использованием TPM, разработанных разными производителями. И, конечно, у каждой реализации есть какие-то свои специфические характеристики, преимущества и недостатки. Поэтому необходимо выбрать именно тот вариант, который сможет обеспечить требуемый уровень безопасности в контексте целевых задач. Следовательно, актуализируется необходимость выявления метрически сопоставимых функций и параметров различных реализаций TPM и способов их применения, что и представлено в данной работе. Акцент сделан на дискретный тип TPM для операционных систем семейства Windows, в силу широкого ее распространении.

Прежде всего, стоит отметить, что TPM (trusted platform module) – это системный компонент, состояние которого отделено от системы, которую он контролирует (хост-системы). Единственное взаимодействие между TPM и хост-системой осуществляется через интерфейс, определенный в релевантной на текущий момент спецификации TPM 2.0 [2] созданной *Trusted Computing Group* [3].

Можно выделить следующие типы реализации TPM:

1) дискретный TPM (dTPM), который представляет собой физический чип, устанавливаемый в специальный слот на материнской плате;

2) встроенный (embedded) TPM (eTPM). Этот тип TPM является частью другого чипа (та же общая концепция, что и встроенный графический процессор);

3) TPM в виде программного обеспечения (software TPM – sTPM), представляющий собой программный эмулятор TPM. Он работает как любое другое программное обеспечение (ПО) и поэтому имеет не большую защиту, чем обычные приложения, если запущен вне доверенной изолированной зоны;

4) виртуальный TPM (vTPM), который обычно предоставляется гипервизором. Этот тип программного обеспечения TPM использует гипервизор для работы в изолированной среде выполнения;

5) прошивка TPM (firmware TPM – fTPM), которая представляет собой дополнительный микрокод центрального процессора (ЦП), который обеспечивает функции, аналогичные дискретному TPM, но в этом случае такие функции будут выполняться ЦП в так называемой доверенной среде выполнения, а не выделенным чипом.

Архитектура dTPM показана на рисунке.

Одной из основных составляющих TPM является PCR (регистры конфигурации платформы). Их можно использовать для хранения полезных ключей для проверки программного обеспечения, запущенного в системе (например, во время загрузки, что является критическим разделом безопасности). Однако TPM не способен выполнять операции такого типа самостоятельно, поэтому загрузчик, ядро или приложение должны быть спроектированы так, чтобы использовать TPM для такой цели.

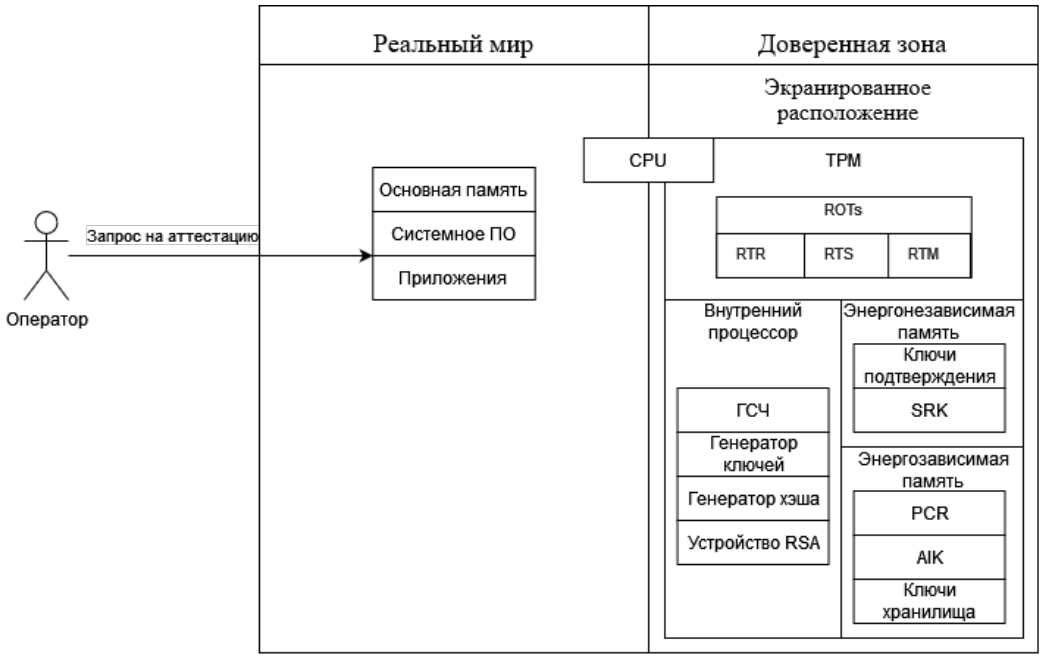
Чаще всего TPM применяют для:

1) *доверенной загрузки*, т. е. TPM может быть использован для хранения ключей загрузки, а также для проверки целостности загрузочного процесса. В таком случае система просто не запустится, если было какое-либо несанкционированное изменение ее конфигурации;

2) *шифрования данных*. TPM позволяет генерировать и хранить ключи шифрования, которые могут использоваться для защиты конфиденциальных данных. С помощью него также можно шифровать и дешифровать внешний диск целиком и фрагментарно, чтобы защитить важные данные на нем;

3) *защиты паролей и аутентификации*. TPM может хранить хеши паролей и сертификатов аутентификации, а также выполнять аутентификацию пользователей и программных сущностей. Это помогает предотвратить компрометацию личности и программных сущностей, предоставляя дополнительный уровень безопасности при авторизации пользователей, в частности, в задачах непрерывной аутентификации [4];

4) *защиты программного обеспечения*, TPM может использоваться для проверки целостно-



Архитектура TPM

Аналитическое сравнение зарубежных реализаций dTPM для ОС семейства Windows

	ASUS TPM-L/ TPM-M	ASUS TPM-SPI	GIGABYTE GC-TPM2.0	ASRock TPM-S	ASRock TPM-SPI	Supermicro TPM	Zunate TPM-SPI	MSI
Версия 1.2	–	–	–	+	–	+	–	–
Версия 2.0	+	+	+	+	+	+	+	+
Заявленные ОС	64–bit Windows 7; 64–bit Windows 8.1; 64–bit Windows 10	64–bit Windows 10 UEFI OS only	64–bit Windows 7; 32/64–bit Windows 8.1; 64–bit Windows 10	Windows7 (только в версии 1.2); Windows 8.1; Windows 10	Windows 10, ОС UEFI	64–bit Windows 8.1; 64–bit Windows 10	Windows 7; Windows 8.1; Windows 10; Windows 11	Windows 10; Windows 11
Создание и хранение криптографических ключей	+	+	+	+	+	+	+	+
Генератор случайных чисел				+		+		
Аутентификация	+	+		+		+		+
Проверка целостности системы	+	+			+	+		
Шифрование диска	+		+	+		+	+	
Защита данных от физической кражи			+	+			+	
Удостоверение личности	+	+	+	+	+	+		

сти программного обеспечения. Это позволяет обнаруживать любые изменения или внедрения в программном обеспечении и предотвращает запуск недоверенного или измененного кода. В частности, следует отметить особо острую важность обеспечения защиты таких сущностей, как автономные и мобильные программные агенты [5] в киберфизических системах.

В случаях, если защищаемое программное обеспечение планируется эксплуатировать на хостах, где изначально не предустанавливалось какое-либо обеспечение для доверенных вычислений, предпочтительным является дискретный тип TPM (dTPM). В таблице приведены основные функции dTPM, заявленные у популярных зарубежных производителей TPM для операционных систем семейства Windows.

ASUS предлагает несколько моделей чипов TPM для различных платформ. Чаще всего встречается ASUS TPM-M R2.0 [6]. Этот чип предлагает надежную защиту данных и обеспечивает аппаратную поддержку для различных функций безопасности компьютера. Он совместим с последними версиями Windows, также *ASUS* имеет чипы с интерфейсом SPI (Serial Peripheral Interface) [7] для подключения к материнской плате.

Преимуществами чипов этой компании являются надежность, быстрая скорость работы и высокая совместимость с другими устройствами.

GIGABYTE предлагает свою модель чипа TPM – GIGABYTE GC-TPM2.0. Этот чип также обеспечивает аппаратную защиту данных и поддерживает стандартные функции безопасности. Чип GIGABYTE GC-TPM2.0 достаточно просто устанавливается. Чипы соответствуют общим критериям доверия уровня EAL4+.

ASRock выпускает несколько моделей чипов TPM с разными характеристиками, которые поддерживают широкий набор криптографических функций. Температурный диапазон работы чипа ASRock TPM-S [8] от –20 до +85 °C, а у чипа TPM-SPI [9] – от –40 до +85 °C. Кро-

ме того, второй чип имеет 24 PCR с поддержкой SHA-1 или SHA-256 и 7206 байт свободной NV-памяти.

Supermicro [10] также предлагает свои модели чипов TPM для обеспечения безопасности данных, которые поддерживают функции TPM 1.2, TPM 2.0. Они совместим с различными материнскими платами и операционными системами. Более того, они поддерживают технологии Intel ® Trusted Execution Technology (TXT) и архитектуры защищенных виртуальных машин AMD ® (только для TPM 1.2).

Не так давно чипы TPM начала выпускать компания *Zunate*, но, к сожалению, о них информации очень мало на данный момент.

MSI [11] выпускает ряд чипов TPM для обеспечения безопасности компьютера, которые предлагают аппаратную защиту и поддерживают функции TPM 2.0. Они совместимы с материнскими платами MSI, а также есть возможность легко интегрировать его с другими устройствами MSI.

Стоит отметить, что на рынке довольно много предложений, но если основная цель – защита программного обеспечения, то стоит обратить внимание на то, чтобы у TPM была необходимая версия спецификации TPM 2.0, которая соответствует требованиям безопасности и обеспечивает реализацию гибких PCR и расширенной авторизации (EA), а также чтобы он был совместим с операционной системой и другими компонентами, где должно функционировать защищаемое программное обеспечение.

Исходя из написанного выше, можно выделить чипы *ASUS* TPM-L/ TPM-M, GIGABYTE GC-TPM2.0 и ASRock TPM-S, у которых заявлены почти все основные функции, кроме того, у них есть поддержка большого числа ОС. Наименее привлекательны чипы от *MSI*, которые интегрируются в основном с устройствами от этой же фирмы, и чипы *Zunate*, информации о которых недостаточно в открытом доступе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Автономной некоммерческой организации «Национальный технологический центр цифровой криптографии» в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Разработка комплекса мер, направленных на обеспечение массовости использования отечественной криптографии (TLS с ГОСТ) в российском сегменте сети Интернет» (шифр «Рассвет»).

Список источников

1. Hardware: TPM module. URL: https://paolozaino.wordpress.com/2018/06/15/tpm module/ (дата обращения: 28.10.2023).

2. TPM 2.0 Library // Trusted Computing Group. URL: https://trustedcomputinggroup.org/resource/tpm-library-specification/ (дата обращения: 28.10.2023).

3. Trusted Computing Group. URL: https://trustedcomputinggroup.org/ (дата обращения: 20.10.2023).

4. *Bezzateev S., Fomicheva S.* Soft multi-factor authentication // 2020 Wave electronics and its application in information and telecommunication systems. WECONF – 2020. 2020. P. 9131537.

5. *Фомичева С. Г.* Моделирование мобильных агентов в киберфизических системах» // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: сб. ст. XXIII Междунар. науч. конф. СПб.: ГУАП, 2020. С. 368–374.

6. Asus TPM manual // www.manua.ls. URL: https://www.manua.ls/asus/tpm-m-r20/manual (дата обращения: 28.10.2023).

7. ASUS TPM-SPI motherboards user guide // https://manuals.plus/. URL: https://manuals.plus/m/4175cf561b8bffcd20e3e139843fec011f3dfdeb8f18df94f8643d02213fdbce_optim.pdf (дата обращения: 28.10.2023).

8. TPM-S ыpecifications. URL: https://www.asrock.com/mb/spec/card.asp?Model=TPM%20Module (дата обращения: 28.10.2023).

9. TPM-SPI // ASRock. URL: https://asrock.com/mb/spec/product.asp?Model=TPM-SPI (дата обращения: 28.11.2023).

10. Trusted Platform Module (TPM) TCG 1./ 2.0 // supermicro. URL: https://www.supermicro.com/manuals/other/tpm.pdf (дата обращения: 28.10.2023).

11. TPM 2.0 User Guide // msi. URL: https://download.msi.com/archive/mnu_exe/mb/TPM209672.pdf (дата обращения: 28.10.2023).

УДК 004.056.55 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-82-87**

А. Ф. Хуцаева*, ******
ассистент
Ж.-М. Н. Дакуо*, ******
ассистент
А. А. Голованов*, ******
ассистент
В. В. Давыдов*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
*** Национальный исследовательский университет ИТМО*

КРИПТОГРАФИЯ НА ИЗОГЕНИЯХ: АНАЛИЗ ОБЛАСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Рассматривается важная область постквантовой криптографии – криптография, основанная на задачах поиска изогений между эллиптическими кривыми. Показано развитие области и ее современное состояние, анализируются дальнейшие перспективы и возможное применение алгоритмов в реальных системах.
Ключевые слова: *криптография, эллиптические кривые, задача поиска изогений.*

A. F. Khutsaeva*, ******
Assistant
J.-M. N. Dakuo*, ******
Assistant
A. A. Golovanov*, ******
Assistant
V. V. Davydov*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
*** ITMO University*

ISOGENY-BASED CRYPTOGRAPHY: AN ANALYSIS OF THE FIELD AND DEVELOPMENT PROSPECTS

In the paper an important field of post-quantum cryptography – isogeny-based cryptography is considered. The development of the field and its current state are shown, further prospects and possible application of algorithms in real systems are analyzed.
Keywords: *cryptography, elliptic curves, isogeny-based cryptography.*

Введение

В последние годы наблюдается значительное увеличение объема исследований, посвященных квантовым компьютерам. Появление мощных квантовых компьютеров поставит под угрозу безопасность многих широко используемых криптографических алгоритмов, а именно – это коснется криптосистем с открытым ключом, в том числе криптосистем на эллиптических кривых. Эти криптосистемы, основанные на задаче дискретного логарифмирования на эллиптических кривых, используются в электронных подписях и при выработке общего ключа, обеспечивая безопасность различных систем и сетей.

В настоящее время в научном сообществе есть большой интерес к алгоритмам постквантовой криптографии, что обусловлено построением первых реальных квантовых компьютеров и попытками реализации алгоритмов Шора и Гровера для осуществления атак на классические криптографические алгоритмы и протоколы. Постквантовая криптография на сегодняшний день активно развивается. В России уже представлены первые постквантовые ал-

горитмы подписи на стандартизацию: «Шиповник» [1], «Крыжовник» [2] и «Гиперикум» [3]. До недавнего времени также кандидатом на стандарт считался алгоритм «Форзиция» [4], построенный на задаче поиска изогений, однако, в связи с публикацией атаки Кастрика – Декрю в 2022 г., алгоритм более не является стойким и не используется на сегодняшний день. Данное направление сегодня является крайне интересным и перспективным, а исследования активно продолжаются.

Криптография на изогениях – самая молодая область постквантовой криптографии. Первые попытки создания криптографических схем приходились на 1997 г. Французский математик Жан-Марк Кувень провел семинар по гомогенным пространствам и криптографии, а затем написал и подал работу на конференцию «Crypto'97», однако получил отказ, и работа не была нигде опубликована. Только в 2006 г. он вновь вернулся к работе, когда стало ясно, что она представляла большой интерес для криптографии.

Проводя поиск по опубликованным работам, можно отметить, что первой работой, описывающей реальное построение криптосистем и протоколов, основанных на задаче поиска изогений, является работа Александра Ростовцева и Елены Маховенко (Александровой) в 2002 г. [5]. Также в открытом доступе можно найти магистерскую диссертацию Антона Столбунова [6], опубликованную в 2004 г., которая описывала алгоритмы шифрования с открытым ключом, основанные на задаче поиска изогений между эллиптическими кривыми. В 2006 г. Ростовцев и Столбунов опубликовали англоязычную статью [7], в которой описывалась «новая математическая проблема» и криптосистема, которая на ней основана. В том же 2006 г. Кувень опубликовал свой труд, который не был опубликован в 1997 г. [8]. В зарубежной литературе именно 2006 год считается стартом нового направления в криптографии – криптографии на изогениях эллиптических кривых. Схема, построенная учеными по отдельности, на сегодняшний день носит единое название – «схема CRS» (Couveignes – Rostovtsev – Stolbunov).

После публикации первых работ данное направление привлекло внимание исследователей, начало формироваться научное сообщество, которое занимается разработкой новых криптографических алгоритмов. В 2009 г. была опубликована первая хеш-функция, основанная на задаче поиска пути в графе изогений [9]. В 2011 г. был опубликован протокол обмена ключами SIDH [10], а впоследствии и его практическая реализация SIKE [11], которая была отправлена на конкурс Национального института стандартов и технологий США (National Institute of Standards and Technology, NIST) в качестве кандидата на стандарт. В 2018 г. был представлен коммутативный алгоритм CSIDH [12], основанный на проблеме, предложенной в алгоритме CRS. В 2022 г. SIDH и SIKE были взломаны [13–15], что вызвало необходимость создания новых алгоритмов. На сегодняшний день область сильно развивается, а ученые предлагают новые идеи и варианты использования изогений в криптографии.

Математический аппарат и задачи

В данном разделе представлен обзор существующих односторонних функций, основанных на задачах изогений эллиптических кривых. После представленной в статье [13] атаки возникли новые подходы при построении криптографических примитивов.

В работах [16] и [17] содержится подробное описание математического аппарата эллиптических кривых и изогений между ними. Пусть E – эллиптическая кривая (ЭК) над конечным полем $\mathbb{F}_p$, p – большое простое число. Также пусть $\mathbf{0}_E$ – точка на бесконечности эллиптической кривой E. Кривая E называется суперсингулярной тогда и только тогда, когда количество точек на кривой E равно $\#E = p+1$.

Пусть даны две эллиптические кривые E и E', тогда изогенией между ними называется морфизм $\phi : E \to E'$, такой что $\phi(\mathbf{0}_E) = \mathbf{0}_{E'}$.

Кольцо эндоморфизмов $\mathrm{End}(E)$ состоит из всех изогений кривой E самой на себя, а $\mathrm{End}_{\mathbb{F}_p}(E)$ – это все изогении над конечным полем $\mathbb{F}_p$. Для суперсингулярных ЭК выполняется условие, что g=3.

Групповое действие – это отображение вида $\star : G \times X \to X$, G – это группа, а X – множество. Пусть $g_1, g_2 \in G$ и $x \in X$, тогда для них выполняется следующее:

$$g_1 \star (g_2 \star x) = (g_1 g_2) \star x. \quad (1)$$

Основное предположение о сложности, лежащее в основе групповых действий, основанных на изогениях, заключается в том, что групповое действие трудно инвертировать [18]. Далее рассмотрим четыре математические задачи, лежащие в основе криптографических алгоритмов, построенных на изогениях.

Определение 1. Group action inverse problem, GAIP. Дана ЭК E и $\mathrm{End}(E) = O$, где O – это порядок алгребраической структуры, которая изоморфна $\mathrm{End}(E)$. Необходимо найти идеал

$\mathbf{a} \subset O$, такой что $E = \mathbf{a} \star E_0$, где E_0 – стартовая кривая.

Определение 2. Multi-Target Group Action Inverse Problem, MT-GAIP. Даны k эллиптических кривых $E_1 ... E_k$, где $\mathrm{End}(E_1) = ... = \mathrm{End}(E_k) = O$. Необходимо найти идеал $\mathbf{a} \subset O$, такой что $E_i = \mathbf{a} \star E_j$, где $i, j \in \{1,2,...,k\}$ и $i \neq j$.

Пусть p – простое, такое что $p - 1 = l_C^c l_A^a l_B^b f$, пусть целое число a, такое что выполняется $l_C^c > l_A^a$. Пусть E_s – эллиптическая кривая над полем $\mathbb{F}_{p^2}$ и $\{P_C, Q_C\}$ – это базис кривой $E_s[l_C^c]$, пусть τ есть изогения $\tau : E_s \to \tilde{E}_s$ степени $(l_C^c - l_A^a)/l$ [19].

Определение 3. The Long Isogeny with Torsion problem, LIT. Пусть d – целое число, взаимно простое с l, такое что $d \gg l_B$. Пусть ϕ – это изогения вида $\phi : E_s \to E_1$ степени d. Необходимо вычислить ϕ на основании кортежей (E_s, P_B, Q_B) и $(E_1, \phi(P_B), \phi(Q))$.

Также существует проблема поиска пути в графе Рамануджана [20].

Определение 4. Path-finding. Пусть p и q – различные простые числа, $r > 0$ и E_0 и E_1 суперсингулярные эллиптические кривые над полем $\mathbb{F}_{p^2}$. Необходимо найти путь длины r в l-изогенном графе соответствующий композиции l-изогений ведущих из E_0 в E_1. Другими словами, необходимо найти изогению степени l^r из E_0 в E_1.

Современное состояние области

В этом разделе описано современное состояние процесса стандартизации и рассматриваются различные примитивы, построенные на приведенных выше задачах.

На сегодняшний день NIST проводит конкурс по выбору постквантовых криптоалгоритмов [21]. Итогом этого конкурса будут постквантовые стандарты схем электронной подписи и инкапсуляции ключа. Эти новые схемы будут использоваться в качестве квантово-устойчивых аналогов существующих стандартов. На данный момент можно выделить следующие основные направления постквантовой криптографии, представленные на конкурсе: криптосистемы на целочисленных решетках; коды, исправляющие ошибки; хеш-функции.

Стоит отметить, что, начиная с 2022 г., NIST проводит конкурс по дополнительным кандидатам на стандартизацию схем электронной подписи, куда входят подписи, построенные задачах изогений эллиптических кривых и многомерных уравнений. Целью дополнительного конкурса является повышение безопасности путем внесения разнообразия математических проблем, на которых строятся подписи, так как на данный момент среди победителей раундов основного конкурса преобладают примитивы, построенные на задачах целочисленных решеток.

В России также проводится конкурс по стандартизации постквантовых алгоритмов, этим занимается технический комитет по стандартизации «Криптографическая защита информации» (ТК26) [22]. За техническим комитетом закреплены объекты стандартизации, относящиеся к методам шифрования (криптографического преобразования) информации, способам их реализации, а также методам обеспечения безопасности информационных технологий с использованием криптографического преобразования информации, включая аутентификацию, имитозащиту и электронную подпись.

До августа 2022 г. схема инкапсуляции ключа SIKE [10] являлась кандидатом в конкурсе NIST. Однако В. Кастрик (W. Castryck) и Т. Декрю (T. Decru) предложили эффективную атаку на SIKE [13], что привело к выбыванию схемы из конкурса на стандартизацию.

Особенностью, с помощью которой можно было реализовать эффективные вычисления, и в то же время недостатком схемы являлась необходимость публикации вспомогательных точек.

Получается, раскрывая промежуточные значения точек кручения, можно найти секретную изогению. В атаке применяется теорема Кани, которая использует кривые второго рода. Для этого строится дополнительная изогения $\kappa : E_0 \to C_1$, степень которой равна некоторой разности порядков выбранных точек кручения. Затем на новой кривой C_1 необходимо найти такие точки, что при склеивании $C_1 \times E_0$ и расклеивании получатся вновь две эллиптические кривые. Таким образом находится один бит секретного значения, так продолжается до полного восстановления секрета. В качестве секретного бита получается выбранная разность, затем подбирается следующий вариант. Так, SIKEp751 можно взломать за 1–2 ч, а SIKEp64 – за 2 с.

Предложенная атака является эффективной, но разработаны следующие методы защиты. В работе [23] предложен новый подход, маскирующий точки кручения и степень изогении, что делает атаку [13] неактуальной. Недостатком схемы являются большие параметры, а именно – размеры открытого ключа. Продолжением данной схемы является работа [24], в которой предложены возможные пути сжатия па-

раметров. Помимо рассмотренных схем, есть работа [25], в которой предлагается генерация эллиптических кривых с определенными свойствами.

Вслед за протоколами обмена ключей предложена схема инкапсуляции ключа [19], использующая изогении больших размерностей, схема основана на проблеме LIT.

Можно заключить, что на данный момент активно идут исследования и разработки по модификации схемы SIKE.

Помимо поиска пути в изогенном графе, на изогениях есть примитивы, построенные на проблеме GAIP и MT-GAIP. Так, подпись SQISign [26] является алгоритмом-кандидатом в дополнительном конкурсе NIST, в схеме используется алгоритм KLPT для эффективного вычисления ключей. Некоторым улучшением данной подписи является подпись SQISignHD [27], где HD означает работу в высших размерностях изогений. Подпись использует тот же самый алгоритм, который лежит в основе атаки [13], но только уже для проведения подписи. На данный момент нет предложений по программной реализации схемы. Подпись [18] также основана на задаче GAIP, предложен ее пороговый вариант [28] и его усовершенствование [29]. Аналогично и схема обмена ключей [12] опирается на ту же задачу.

Рассмотрим характеристики описанных схем, представленные в табл. 1–3. Рассмотрен уровень безопасности 1 согласно конкурсу NIST, за исключением схем CSI-FiSh, Threshold CSI-FiSh и усовершенствованная Threshold CSI-FiSh. Первые две рассмотрены при параметрах $t = 13$ и $S = 2^8$, последняя при $t = 5$, $S = 6$ порог (5, 10).

Таблица 1

Характеристики схем обмена ключей

Схема	Размер открытого ключа, байт	Размер закрытого ключа, байт	Скорость генерации общего ключа, с
M-SIDH	2585	369	–
MD-SIDH	6040	863	–
binSIDH	~909	–	~9,46
terSIDH	~588	–	1,38

Таблица 2

Характеристики схем инкапсуляции ключа

Схема	Размер открытого ключа, байт	Размер шифротекста, байт	Размер подписи, байт	Скорость инкапсуляции ключа, сек	Скорость декапсуляции ключа, с
IS-CUBE	649	1566	177	0,61	17,13

Таблица 3

Характеристики схем подписей

Схема	Размер открытого ключа, байт	Размер закрытого ключа, байт	Размер подписи, байт	Скорость генерации подписи, с
SQISign	64	782	177	~ 2,5
SQISignHD	–	–	109	0,028
CSI-FiSh	32	8192	1995	0,671
Threshold CSI-FiSh	128	–	1880	–
Усов. Threshold CSI-FiSh	–	–	–	60,48

Как можно заметить, подписи на изогениях обладают малыми размерами ключей и относительно небольшими размерами подписей. Это преимущество достигается за счет того, что открытом ключом в таких схемах служит j-инвариант эллиптической кривой, размеры которого не слишком велики. В то время как подписи, основанные на других постквантовых задачах, обладают в несколько раз большими размерами. На сегодняшний день основным недостатком является сложность проведения и реализации эффективных вычислений математического аппарата изогений.

Перспективы развития

Можно заметить, что атака Кастрика – Декрю [13] изменила подход при разработке примитивов на изогениях. Данные перемены также прослеживаются и в последних предложенных атаках на так называемые SIDH-подобные схемы. По сравнению с оригинальной атакой [13], они более эффективны благодаря различным подходам, а именно:

1) атака Маино – Мартиндаль [14], являющаяся развитием атаки Кастрика – Декрю. Она не требует информации об эндоморфизме стартовой кривой, что позволяет взломать схемы с произвольно выбранной кривой. Предложенный подход расширяет применимость атаки;

2) атака Роберта [15] продолжает идею предыдущих двух атак. Данная атака работает в высших размерностях изогений, что позволяет ей полиномиально решать задачу вычисления суперсингулярной изогении при выбранных параметрах A и B, таких что $A \le B^2$ (A, B – порядки подгрупп кручения ЭК для построения изогении).

Научное сообщество активно разрабатывает новые алгоритмы, которые были бы устойчивы к данным атакам. Можно выделить некоторые новые перспективные идеи в этом направлении:

1) маскирование степени изогении или образов точек кручения. Примером применения этой идеи являются криптосистемы MD-SIDH [23], M-SIDH [23], FESTA [30];

2) кроме того, авторы FESTA предложили конструктивно использовать теорему Кани, на которой основывается атака на SIKE, и реализовали на ее основе trapdoor-функцию криптосистемы;

3) использование изогений высших размерностей. Примером является электронная подпись SQISignHD [27]. Данная работа также переиспользует идеи атак для целей защиты. Кроме того, авторы подчеркивают, что им удалось добиться еще более компактных размеров подписи, сократить время работы алгоритма, а также упростить анализ криптосистемы, в сравнении с предшественником – SQISign;

4) в качестве противодействия атаке Роберта, предлагается строить такие криптосистемы на изогениях, в которых параметры A и B выбраны так, что $A \gg B^2$. Ярким примером такой работы является механизм инкапсуляции ключа IS-CUBE [19], основанный на предложенной ими новой вычислительной задаче LIT. В работе авторы также достигают следующих свойств, упрощающих реализацию и усложняющие атаку, что делает эту криптосистему перспективной для реализации:

– линейная зависимость p от параметра безопасности λ;

– вычисления изогений порядка не больше 2;

– стартовая кривая выбирается случайно.

Заключение

Криптография на задачах изогений эллиптических кривых – относительно молодое направление. При этом, по сравнению с остальными областями постквантовых алгоритмов, криптосистемы на изогениях обладают небольшими размерами ключей, и за счет этого имели репутацию многообещающей криптографической защиты. После атаки Кастрика – Декрю в 2022 г. доверие к этой области сильно упало [31].

Тем не менее исследователи продолжают разрабатывать протоколы и алгоритмы на других стойких задачах на изогениях, появляются свежие идеи – маскирование, использование изогений высших размерностей, новые вычислительно сложные задачи. Последние предложенные схемы обладают большей защищенностью, более компактными размерами подписей и шифртекстов. Кроме того, криптосистемы на изогениях становятся проще для криптоанализа, что позволяет явно сводить безопасность схем к сложности решения задач на изогениях [27].

Атаку [13] удалось превратить из недостатка в достоинство, предложив новое направление развития криптографии на изогениях. На данный момент большой интерес представляют изогении высших размерностей и их практическая реализация.

Список источников

1. Shipovnik: Github. 2023. URL: https://github.com/QAPP-tech/shipovnik_tc26 (дата обращения: 09.12.2023).

2. Проект стандартизации постквантовой цифровой подписи / Е. А. Киршанова [и др.] // Прикладная дискретная математика. Прил. 2020. № 13. С. 44–51.

3. Hypericum: Github. 2023. URL: https://github.com/QAPP-tech/hypericum_tc26 (дата обращения: 09.12.2023).

4. Постквантовый криптографический протокол выработки общего ключа, основанный на изогениях суперсингулярных эллиптических кривых / С. В. Гребнев [и др.] // Безопасные информационные технологии: сб. тр. XI Междунар. науч.-техн. конф. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. С. 99–103.

5. *Ростовцев А. Г., Маховенко Е. Б.* Криптосистема на категории изогенных эллиптических кривых // Проблемы информац. безопасности. Компьютерные системы. 2002. № 3. С. 74.

6. *Столбунов А. Г.* Шифрование с открытым ключом на циклах изогенных эллиптических кривых // ResearchGate. 2004. URL: https://www.researchgate.net/profile/Anton-Stolbunov/publication/326979680_Public-Key_Encryption_Based_on_Cycles_of_Isogenous_Elliptic_Curves/links/5b6f54eb45851546c9fb795a/Public-Key-Encryption-Based-on-Cycles-of-Isogenous-Elliptic-Curves.pdf (дата обращения: 08.12.2023).

7. *Rostovtsev A., Stolbunov A.* Public-key cryptosystem based on isogenies // Cryptology ePrint Archive. 2006. P. 1–19.

8. *Couveignes J. M.* Hard homogeneous spaces // Cryptology ePrint Archive. 2006. P. 1–15.

9. *Charles D. X., Lauter K. E., Goren E. Z.* Cryptographic hash functions from expander graphs // Journal of cryptology. 2009. Vol. 22, № 1. P. 93–113.

10. *Jao D., De Feo L.* Towards quantum-resistant cryptosystems from supersingular elliptic curve isogenies // Post-quantum cryptography: 4th International workshop. PQCrypto – 2011 (Taipei, Taiwan, November 29–December 2, 2011). Proceedings 4. Springer Berlin Heidelberg, 2011. P. 19–34.

11. Supersingular isogeny key encapsulation / R. Azarderakhsh [et al.] // Submission to the NIST post-quantum standardization project. 2017. Vol. 152. P. 154–155.

12. CSIDH: an efficient post-quantum commutative group action / W. Castryck [et al.] // Advances in cryptology – ASIACRYPT – 2018: 24th International conference on the theory and application of cryptology and information security (Brisbane, QLD, Australia, December 2–6, 2018). Proceedings. P. III 24. Springer International Publishing, 2018. P. 395–427.

13. *Castryck W., Decru T.* An efficient key recovery attack on SIDH (preliminary version) // Cryptology ePrint Archive. 2022. P. 1–26.

14. *Maino L., Martindale C.* An attack on SIDH with arbitrary starting curve // Cryptology ePrint Archive. 2022. P. 1–26.

15. *Robert D.* Breaking SIDH in polynomial time // Annual International conference on the theory and applications of cryptographic techniques. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. P. 472–503.

16. *Cassels J. W. S., Silverman J. H.* The arithmetic of elliptic curves. 1987. P. 513.

17. *De Feo L.* Mathematics of isogeny based cryptography // arXiv preprint. 2017. arXiv:1711.04062. 2017.

18. *Beullens W., Kleinjung T., Vercauteren F.* CSI-FiSh: efficient isogeny based signatures through class group computations // International conference on the theory and application of cryptology and information security. Cham: Springer International Publishing, 2019. P. 227–247.

19. *Moriya T.* IS-CUBE: An isogeny-based compact KEM using a boxed SIDH diagram // Cryptology ePrint Archive. 2023. P. 1–30.

20. Ramanujan graphs in cryptography / A. Costache [et al.] // Research directions in number theory: women in numbers IV. Springer International Publishing, 2019. P. 1–40.

21. NIST. URL: https://www.nist.gov/ (дата обращения: 01.12.2023).

22. Технический комитет по стандартизации «Криптографическая защита информации». URL: https://tc26.ru/ (дата обращения: 01.12.2023).

23. *Fouotsa T. B., Moriya T., Petit C.* M-SIDH and MD-SIDH: countering SIDH attacks by masking information // Annual International conference on the theory and applications of cryptographic techniques. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. P. 282–309.

24. Public-key Compression in M-SIDH / K. Lin [et al.] // Cryptology. ePrint Archive. 2023.

25. *Basso A., Fouotsa T. B.* New SIDH countermeasures for a more efficient key exchange // Cryptology. ePrint Archive. 2023.

26. SQISign: compact post-quantum signatures from quaternions and isogenies / L. de Feo [et al.] // Advances in cryptology – ASIACRYPT 2020: 26th International conference on the theory and application of cryptology and information security (Daejeon, South Korea, December 7–11, 2020): Proceedings. P. I26. Springer International Publishing, 2020. P. 64–93.

27. SQISignHD: new dimensions in cryptography / P. Dartois [et al.] // Cryptology. ePrint Archive. 2023.

28. *de Feo L., Meyer M.* Threshold schemes from isogeny assumptions // Public-key cryptography – PKC 2020: 23rd IACR International conference on practice and theory of public-key cryptography (Edinburgh, UK, May 4–7, 2020): roceedings. P. II23. Springer International Publishing, 2020. P. 187–212.

29. Усовершенствованная схема пороговой подписи CSI-FiSh со свойством быстрой сборки секрета / В. В. Давыдов [и др.] // Вестн. СибГУТИ. 2023. № 1 (60). С. 76–91.

30. *Basso A., Maino L., Pope G.* FESTA: fast encryption from supersingular torsion attacks // Cryptology. ePrint Archive. 2023.

31. 'Post-Quantum' cryptography scheme is cracked on a laptop // Quanta magazine. URL: https://www.quantamagazine.org/post-quantum-cryptography-scheme-is-cracked-on-a-laptop-20220824/ (дата обращения: 09.12.2023).

УДК 004.9 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-88-92**

О. Б. Чернышева*
старший преподаватель
О. А. Шевкун*
студент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕДИЦИНСКИХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Рассмотрены основные принципы автоматического распознавания и классификации медицинских данных с использованием методов машинного обучения. Проведен обзор современных достижений и тенденций в автоматическом распознавании и классификации медицинских данных с использованием методов машинного обучения. Рассмотрены перспективы развития этой области.
Ключевые слова: *искусственный интеллект, машинное обучение, медицина, здравоохранение, автоматизация.*

O. B. Chernysheva*
Senior Lecturer
O. A. Shevkun*
Student
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

AUTOMATIC RECOGNITION AND CLASSIFICATION OF MEDICAL DATA USING MACHINE LEARNING

The article discusses the basic principles of automatic recognition and classification of medical data using machine learning methods. The review of modern achievements and trends in the automatic recognition and classification of medical data using machine learning methods is carried out. The prospects for the development of this area are considered.
Keywords: *artificial intelligence, machine learning, medicine, healthcare, automation.*

Медицинские данные представляют собой сложный и разнообразный источник информации. Они могут быть использованы как для диагностики и лечения, так и для прогнозирования и исследований заболеваний. Однако извлечение необходимой информации из них является непростой задачей. Медицинские данные часто имеют высокую размерность, неоднородность, шум и пропуски, а кроме того, могут быть представлены в различных форматах, таких как текст, таблица, временные ряды, изображение, видео, трехмерные изображения и видео и пр.

Автоматическое распознавание и классификация медицинских данных является важной областью исследований, которая направлена на разработку алгоритмов и систем, способных анализировать и интерпретировать их без человеческого вмешательства. Это может повысить эффективность и качество медицинской помощи, а также снизить затраты и риски [1].

Методы машинного обучения являются мощными инструментами для автоматического распознавания и классификации медицинских данных, так как они способны обработать большой объем данных и адаптироваться к новым условиям. Они могут быть разделены на три основные категории: обучение с учителем, обучение без учителя и обучение с подкреплением. В зависимости от типа и цели анализа, могут быть применены различные методы машинного обучения, такие как линейная регрессия, логистическая регрессия, деревья решений, нейронные сети, кластеризация, ассоциативные правила, генетические алгоритмы и глубокое обучение.

Хотя применение искусственного интеллекта (ИИ) в медицине является одним из самых

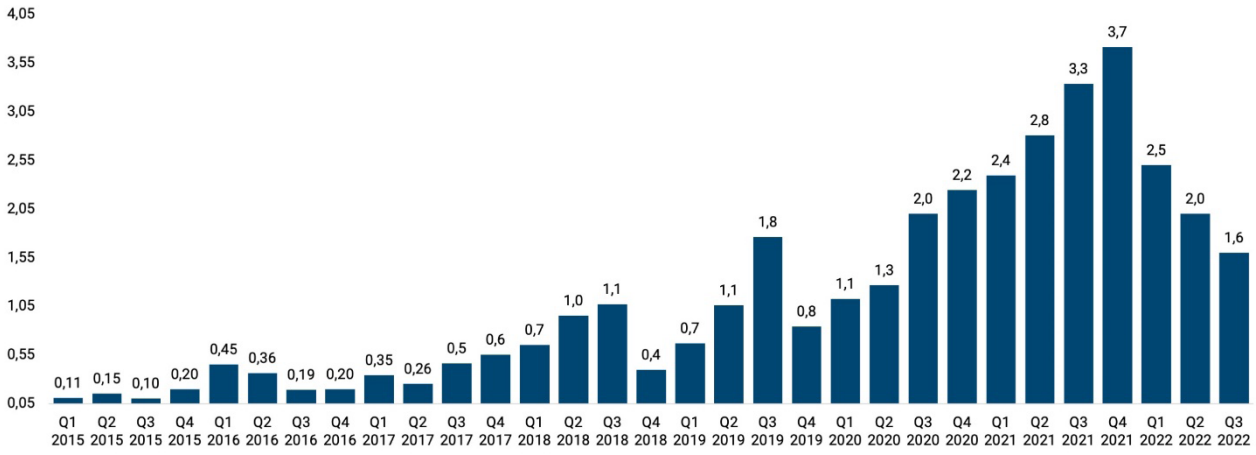


Рис. 1. Динамика венчурного инвестирования в искусственный интеллект для медицины, по данным CB Insights

перспективных и актуальных направлений развития науки, несмотря на огромный потенциал и интерес, исследования в этой области долгое время не получали достаточного финансирования и поддержки от государственных и частных организаций. Это было связано с рядом факторов: высокая сложность и специфичность медицинских данных, недостаток квалифицированных специалистов и экспертов, юридические и этические ограничения, а также низкая готовность к инновациям со стороны медицинского сообщества и пациентов, все это препятствовало развитию ИИ в медицине [2].

Однако ситуация начала меняться с появлением большого количества оцифрованных медицинских данных, которые стали доступны для анализа и обработки. Они включают в себя электронные медицинские карты, результаты лабораторных тестов, рентгеновские снимки, магнитно-резонансную и компьютерную томографию, ультразвуковую диагностику, электрокардиографию и другие виды диагностических изображений и сигналов, а также генетические данные, биомаркеры, клинические протоколы и рекомендации.

Большие объемы оцифрованных медицинских данных создали новые возможности для применения ИИ в медицине. Методы ИИ позволяют автоматизировать и оптимизировать различные процессы в медицине, такие как диагностика, лечение, прогнозирование, профилактика, обучение и научные исследования. Методы ИИ также способствуют повышению качества жизни пациентов, уменьшению затрат на здравоохранение, усилению взаимодействия между медицинскими работниками и пациентами, а также увеличению доступности и справедливости медицинской помощи.

Бум финансирования в сфере применения ИИ в медицине пришелся на период пандемии коронавируса, которая стала глобальным вызовом для здравоохранения и общества (рис. 1). Пандемия COVID-19 продемонстрировала необходимость и востребованность ИИ в медицине, так как ИИ помогал в борьбе с вирусом на разных уровнях, таких как детектирование и отслеживание инфекции, разработка и тестирование вакцин и лекарств, анализ и моделирование эпидемиологических данных, поддержка и консультация пациентов и медицинского персонала, а также информирование и образование общественности [3].

По данным отчета *Grand View Research*, рынок ИИ в медицине достиг 15,4 млрд долларов в 2022 г., что свидетельствует о высоком потенциале и перспективе этой области. Согласно этому же отчету, рынок ИИ в медицине продолжит расти и достигнет 201,3 млрд долларов к 2030 г., показывая среднегодовой темп роста (CAGR) 37,5 % с 2023 по 2030 г. Это обусловлено растущим спросом на инновационные решения для улучшения качества и эффективности медицинской помощи, а также увеличением инвестиций и поддержки со стороны правительственных и частных организаций.

Одним из примеров таких инновационных решений с использованием ИИ являются продукты компании ООО «АЙРА Лабс», которая разработала ряд алгоритмов для автоматического распознавания и классификации меди-

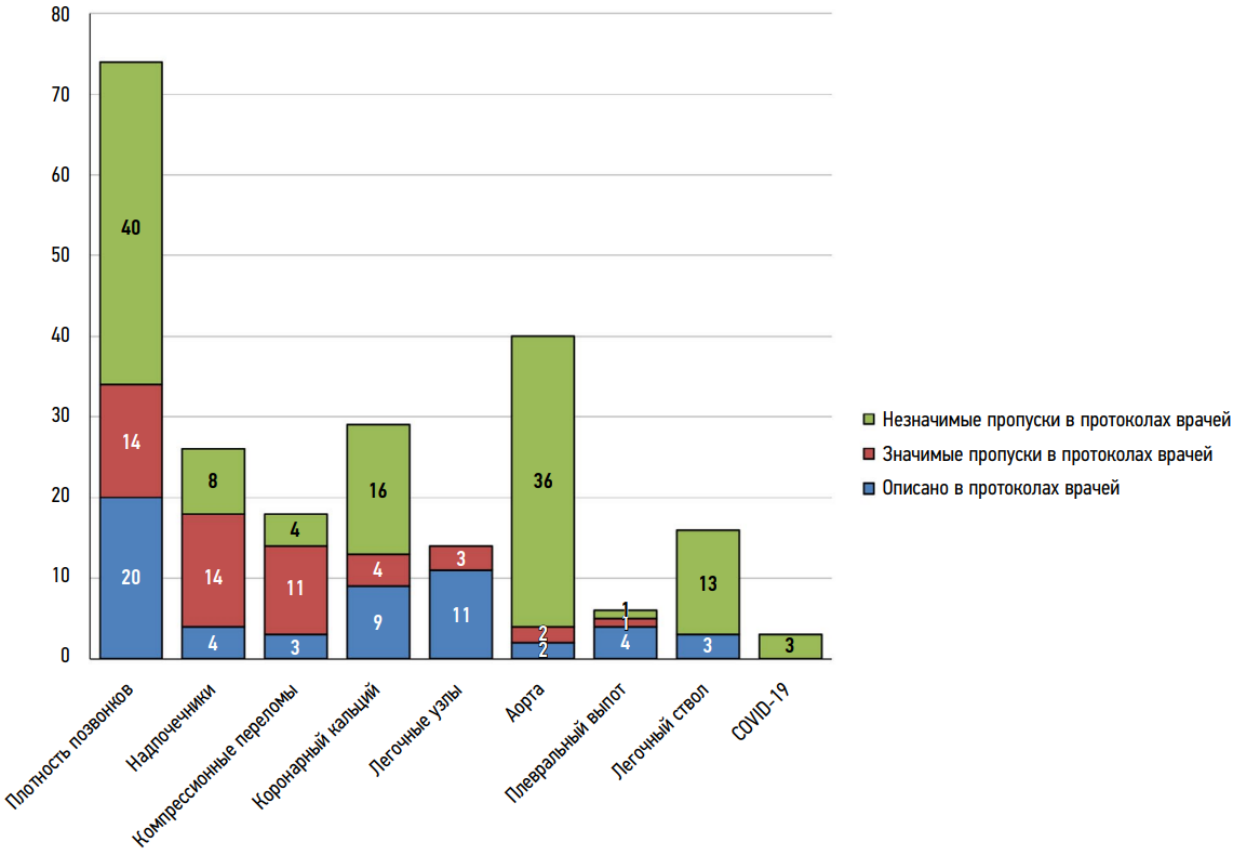


Рис. 2. Результаты исследования с использованием алгоритма Multi-IRA по количеству находок (ранжированы по количеству значимых пропусков)

цинских данных. Так, алгоритм COVID-IRA способен определять уплотнения легочной ткани по данным компьютерной томографии (КТ) грудной клетки, которые являются характерными для COVID-19. Этот алгоритм был разработан в России в 2022 г. и протестирован в рамках московского эксперимента по внедрению ИИ в сферу здравоохранения. Он показал высокую точность в диагностике COVID-19: площадь под кривой ROC (ROC AUC) составила 0,98, чувствительность – 0,95, специфичность – 0,94. В этом же исследовании при сравнении алгоритма комплексного анализа Multi-IRA с результатами обследования врачей было обнаружено, что в 34 % случаев алгоритм смог выявить патологию, пропущенную врачами (рис. 2). Компания ООО «АЙРА Лабс» также разработала другие продукты для автоматического распознавания и классификации медицинских данных, такие как Agatston-IRA, Genant-IRA, Aorta-IRA и др. На данный момент сервисы IRA-Labs активно работают в московских поликлиниках, ими обработано уже более 1 млн исследований, что подтверждает их эффективность и надежность [4].

ИИ могут также использоваться для предсказания заболеваний у пациента, особенно тех, которые имеют высокий риск смертности или осложнений. В Технологическом институте Джорджии было проведено исследование на предмет возможного появления у пациентов сердечной недостаточности – заболевания, являющегося одной из главных причин смертей мире. В исследовании использовались разные наборы данных и несколько методов для их анализа, а именно – логистическая регрессия, метод опорных векторов, многослойный перцептрон и метод ближайших соседей (рис. 3). Лучшим показал себя метод с использованием многослойного перцептрона обученного на выборки из 265 тысяч карт пациентов в векторном представлении, показав точность порядка 0,82 ROC AUC [5].

В исследовании также было показано, что использование векторных представлений медицинских концептов вместо one-hot-кодирования улучшает качество предсказания сердечной недостаточности. Авторы исследования так-

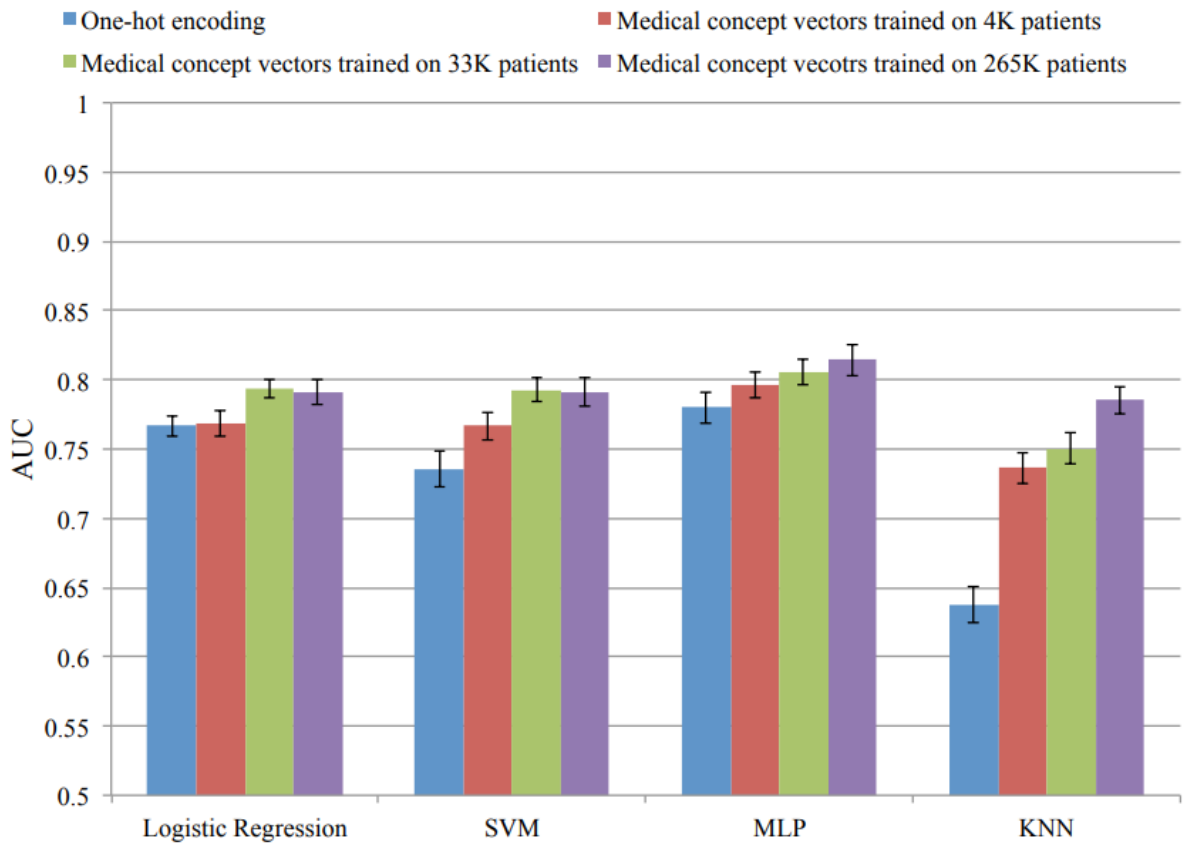


Рис. 3. Эффективность прогнозирования сердечной недостаточности при использовании различных моделей и входных векторов

же провели качественный анализ сходства медицинских концепций по разным категориям, таким как диагнозы, лекарства и процедуры. Было обнаружено, что векторные представления могут выявлять клинически релевантные и интерпретируемые связи между ними.

Однако применение ИИ в медицине также сталкивается с рядом проблем и сложностей, которые требуют дальнейшего изучения и решения. Среди них можно выделить следующие: недостаток качественных и стандартизированных данных, сложность интерпретации и объяснения результатов, необходимость соблюдения конфиденциальности и безопасности данных, а также учет этических, юридических и социальных аспектов.

Так, например, сервис IRA, который позволяет определять уплотнения легочной ткани по данным КТ, имеет ограничения из-за исходного набора данных, на котором был обучен. Этот сервис не может использоваться для пациентов моложе 18 лет, так как он не адаптирован к особенностям детской анатомии. Также его можно использовать только с определенными настройками снимка томографа и только с моделями от *Canon*, *GE*, *Philips* и *Siemens*, в ином случае корректная работа не гарантируется. Это означает, что этот сервис не может быть доступен для всех пациентов и врачей.

В свою очередь, метод предсказания сердечной недостаточности от университета Джорджии показал необходимость большого количества исходных данных для обучения, так как он использует глубокое обучение и нейронные сети для анализа электронных медицинских записей. Однако получение и обработка таких данных могут быть затруднены из-за проблем с качеством, стандартизацией, конфиденциальностью и безопасностью данных. Также их метод показал низкую чувствительность к редким событиям, таким как развитие сердечной недостаточности у пациентов без предшествующих факторов риска. Это означает, что этот метод может ошибиться или опоздать с диагнозом для некоторых пациентов.

Эти примеры показывают, что искусственный интеллект не является панацеей и не может полностью заменить человека. Он требует

постоянного контроля, корректировки и оценки со стороны врачей и экспертов. Также ИИ в медицине должен учитывать индивидуальные особенности каждого пациента и ситуации, а также этические, юридические и социальные аспекты применения в медицине. Однако, несмотря на это, можно сказать, что автоматическое распознавание и классификация медицинских данных с использованием методов машинного обучения является перспективной и актуальной областью исследований, которая может принести много пользы для медицины и здравоохранения, а также имеет большой потенциал для улучшения качества жизни и здоровья людей.

Список источников

1. Medical concept representation learning from electronic health records and its application on heart failure prediction / E. Choi [et al.]. 2016. URL: https://arxiv.org/abs/1602.03686 (дата обращения: 18.11.2023).

2. Artificial Intelligence in healthcare market size, share, and trends analysis report by component (software solutions, hardware, services), by application (virtual assistants, connected machines), by region, and segment forecasts, 2023–2030 // Grand view researchю URL: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/artificial-intelligence-ai-healthcare-market/ (дата обращения: 20.11.2023).

3. Обзор российских систем искусственного интеллекта для здравоохранения // webiomed. URL: https://webiomed.ru/blog/obzor-rossiiskikh-sistem-iskusstvennogo-intellekta-dlia-zdravookhraneniia/ (дата обращения: 20.08.2023).

4. Диагностическая и экономическая оценка применения комплексного алгоритма искусственного интеллекта, направленного на выявление десяти патологических находок по данным компьютерной томографии органов грудной клетки / В. Ю. Чернина [и др.] // Digaital diagnostic. 2023. Т. 4, № 2. С. 105–132.

5. Chest-IRA – ИИ-сервисы в лучевой диагностике // Центр диагностики и телемедицины. URL: https://mosmed.ai/service_catalog/chestira/ (дата обращения: 20.11.2023).

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА

УДК 004.056; 519.812

С. В. Беззатеев*
доктор технических наук, доцент
Т. Н. Елина*
кандидат экономических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОСОБЕННОСТИ ТРАЕКТОРИЙ КАРЬЕРНОГО РОСТА СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Рассмотрены вопросы трудоустройства специалистов в области информационной безопасности на предприятиях России, данные статистических исследований в этой области. Проведен анализ уровня оплаты труда специалистов и наличия у них образования в области информационной безопасности. Структура профессий на рассмотренных предприятиях предполагает потребность в специалистах как в области проектирования и разработки средств защиты информации, так и в области организационно-правового и управленческого обеспечения информационной безопасности.
Ключевые слова: *информационная безопасность, рынок труда, трудоустройство.*

S. V. Bezzateev*
Dr. Sc., Tech., Associate Professor
T. N. Yelina*
PhD, Economic, Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

FEATURES OF CAREER GROWTH TRAJECTORIES OF INFORMATION SECURITY SPECIALISTS

The issues of employment of specialists in the field of information security at Russian enterprises are considered. Data from statistical studies in this area are considered. An analysis of the level of remuneration of specialists and their education in the field of information security was carried out. The structure of professions at the enterprises considered suggests a need for specialists both in the field of design and development of information security, and in the field of organizational, legal and management support for information security.
Keywords: *information security, labor market, employment.*

На сегодняшний день программы высшего образования в области информационной безопасности укрупненной группы специальностей и направлений (УГСН) 10.00.00 представлены достаточно обширно. Кроме бакалавриата 10.03.01 и магистратуры 10.04.01, стандартами высшего образования Российской Федерации предусмотрены пять направлений специалитета, каждое из которых имеет свою специфику, основано на определенных профессиональных стандартах и предусматривает свой карьерный рост в области кибербезопасности.

Под карьерным ростом в данном случае понимается процесс реализации выпускником профессиональных ожиданий, достижения карьерных целей и приобретения навыков решения сложных профессиональных задач [1]. Основным критерием оценки карьерного роста специалиста можно считать степень соответствия желаемых целей и реальных результатов.

Часто при выборе направления обучения абитуриент не представляет возможных траекторий своего будущего роста, принимая решения, основываясь на модных тенденциях либо на поверхностных знаниях о направлении обучения. Такой выбор приводит к разочарованию в процессе обучения, смене направления или дальнейшей реализации в рамках совершенно другого профессионального направления.

Для будущего специалиста по информационной безопасности необходимо понимать, что это понятие охватывает чрезвычайно широкий

круг профессиональных задач, включая работу с программными, аппаратными средствами, организационные или управленческие задачи, программирование или проектирование, и даже преподавательская деятельность. На этапе начала обучения невозможно спланировать какое-то одно направление, поэтому необходимо представлять возможные траектории своего профессионального развития и оценивать свои текущие возможности для каждого этапа.

В первую очередь, необходимо понимать, что, согласно «Доктрине информационной безопасности Российской Федерации» [2], информационная безопасность (ИБ), или кибербезопасность, – это состояние защищенности интересов стейкхолдеров предприятия в информационной сфере, определяющихся совокупностью сбалансированных интересов личности, общества, государства и бизнеса. Поэтому состав задач, решаемых специалистом в области информационной безопасности, зависит от состава стейкхолдеров, т. е. заинтересованных лиц, к которым относятся персонал внутри предприятия, контрагенты и регуляторы, от структуры и состава информационной сферы и от интересов соответствующего хозяйствующего субъекта. В качестве предприятия-работодателя для выпускников направлений группы «Информационная безопасность» может выступать любая из следующих типов организаций:

– коммерческое предприятие;

– государственное предприятие;

– компания-разработчик средств защиты информации (СЗИ);

– сервисная компания в области ИБ.

При этом задачи специалистов в области ИБ на предприятии часто сильно зависят от отношения руководства к системе информационной безопасности, которое определяется не только типом предприятия и его сферой деятельности, но и уровнем «зрелости» его системы ИБ. Можно выделить следующие уровни зрелости ИБ предприятия: ИБ-хаос, защита инфраструктуры, compliance, защита от угроз, управление рисками и бизнес-ориентация. Причем при продвижении к более зрелому уровню, компании, как правило, переносят акценты с технических средств защиты к средствам организационно-управленческим.

Деятельность в области информационной безопасности не ограничивается решением технических задач и навыками программирования. Условно все специальности УГСН 10.00.00 можно разделить на «технические» и «гуманитарные». И если актуальность деятельности специалиста «технической» направленности очевидна, то абитуриенты и студенты специальности «гуманитарной» часто задаются вопросом об их роли в системе информационной безопасности предприятия. Здесь необходимо отметить, что уязвимости в системе информационной безопасности предприятия могут быть не только в программном, аппаратном обеспечении, в конфигурации или архитектуре систем, но и не менее важен контроль и анализ уязвимостей в поведении людей, в документообороте, в данных.

Поэтому на сегодняшний день важность как технических, так и организационных вопросов ИБ для любой организации чрезвычайно высока. Затраты, которые несет бизнес в связи с утечками данных и реализацией других угроз информационной безопасности, можно снижать как программно-аппаратными, так и организационно-управленческими методами, и часто даже невозможно определить, какой из типов методов будет эффективнее. Кроме того, предпочтение тем или иным методам в одной и той же организации зависит от этапа жизненного цикла, на котором находится как сама организация, так и система ее ИБ.

Согласно исследованиям Алексея Лукацкого (бизнес-консультант по безопасности *Positive Technologies*) (https://lukatsky.ru/trends/obzor-zarplat-spetsialistov-po-ib-v-rossii.html), направления работы специалистов по ИБ в России по итогам 2022 г. имеют состав и структуру, показанные на рис. 1.

Как можно увидеть из рис. 1, работы, не связанные с «технической» направленностью, составляют около 30 % всех вариантов. Организационный специалист по информационной безопасности может занимать следующие должности:

– CISO;

– DPO;

– методолог ИБ;

– ИТ-юрист;

– аудитор ИБ;

– рисковик;

– специалист по повышению осведомленности;

– ИБ-комплаенс;

– менеджер систем управления информационной безопасностью;

– менеджер процессов SOC.

Анализ уровня заработной платы различных категорий специалистов ИБ (рис. 2) показывает, тем не менее, более высокий уровень зарплаты у разработчиков, по сравнению со специалистами в области «бумажной работы». Необходимо отметить, что на рис. 2 размеры заработной

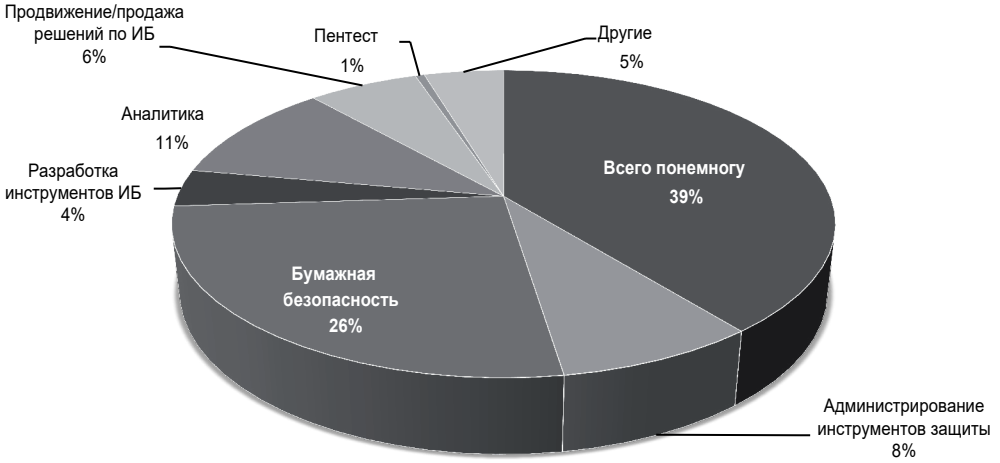


Рис. 1. Структура направлений работы специалистов в области информационной безопасности

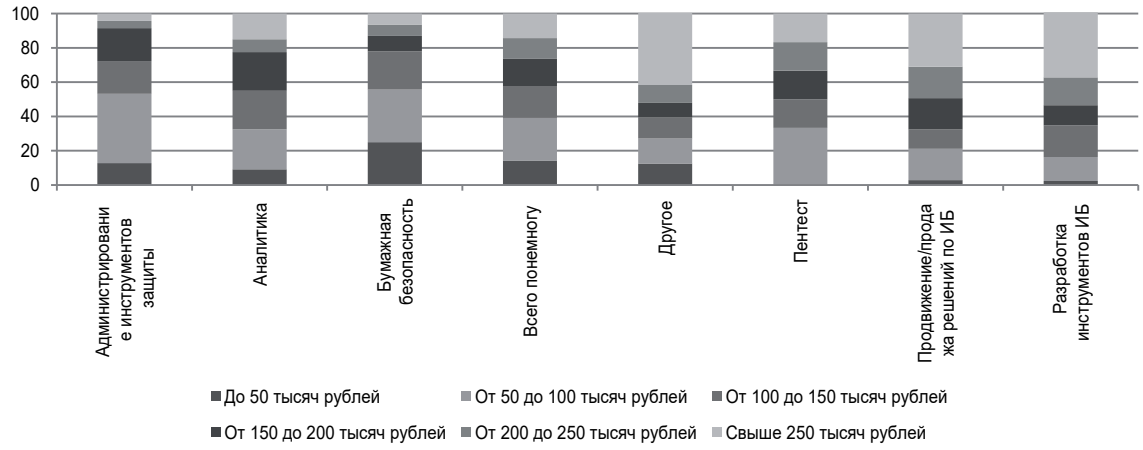


Рис. 2. Структура распределения размеров заработной платы специалистов в области информационной безопасности

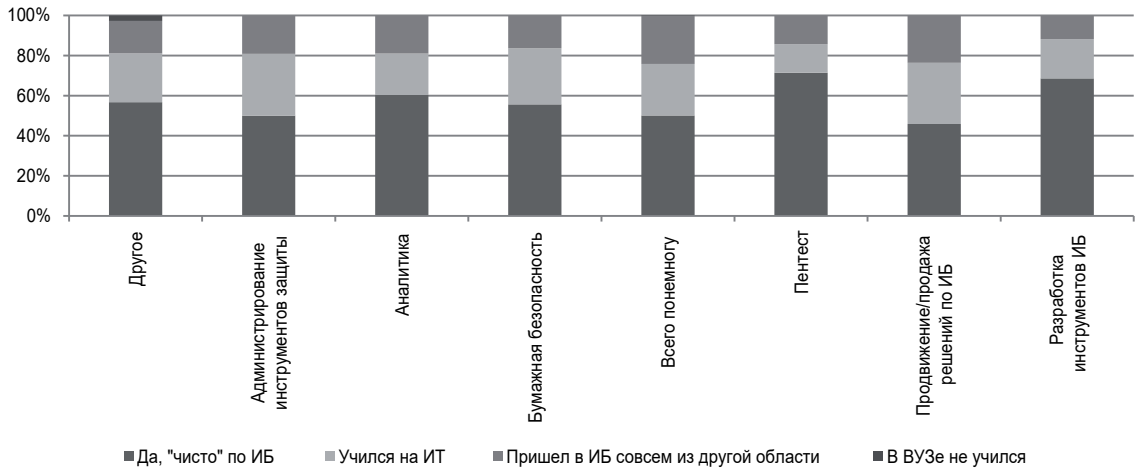


Рис. 3. Данные по профильному образованию специалистов по ИБ

платы приведены в целом по России, включая данные как по Москве и Санкт-Петербургу, так и по другим регионам нашей страны.

На рис. 3 приведены данные по профильному образованию специалистов по ИБ на предприятиях России. Согласно представленной информации, можно сделать вывод о высокой доле специалистов с образованием в области информационной безопасности и ничтожно малой доли работников, не имеющих высшего образования. Специалисты с непрофильным образованием составляют невысокую часть по каждому направлению в рамках ИБ.

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1. На современном рынке труда имеется достаточно высокая потребность в специалистах в области информационной безопасности.

2. Потребность предприятия в специалистах и «технической», и «гуманитарной» направленностей примерно одинакова.

3. Уровень заработной платы работников «гуманитарной» направленности уступает уровню «технических» специалистов.

4. Доля работников с профильным образованием в области информационной безопасности достаточно высока, что свидетельствует об обоснованности выбора абитуриентов этого направления, а также о высокой сложности профессиональных обязанностей сотрудников данной отрасли.

Список источников

1. *Елина Т. Н., Дыптан Е. А.* Взаимосвязь информационных дисциплин профессионального цикла при подготовке бакалавров экономического направления // Педагог. образование и наука. 2011. № 12. С. 105–108.

2. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации / утв. Указом Президента Российской Федерации от 5 дек. 2016 г. № 64. 05.12.2016.

УДК 621.3.08

С. Ю. Мельников*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ ПО «ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ»

Рассмотрены возможные варианты цепей несинусоидального тока для их лабораторного исследования. Приведен пример предварительного расчета одного из вариантов цепи и результаты его компьютерного моделирования.
Ключевые слова: *электротехника, лабораторный практикум, цепь несинусоидального тока.*

S. Yu. Melnikov*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

NON-SINUSOIDAL CURRENT CIRCUITS INVESTIGATION IN ELECTRICAL ENGINEERING LABORATORY WORKSHOP

Possible options of non-sinusoidal current circuits for their laboratory examination are considered. An example of a preliminary calculation of one of the circuit options and the results of its computer modeling is given. The format of a laboratory workshop on most sections of electrical engineering with the study of circuits of similar configuration connected to sources of various types is considered.
Keywords: *electrical engineering, laboratory workshop, non-sinusoidal current circuit.*

В настоящее время в перечне лабораторных работ, выполняемых в лаборатории электротехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, отсутствуют работы, связанные с исследованием цепей периодического несинусоидального тока. При этом техническая возможность выполнения таких работ на новых стендах «Основы электротехники и электроники», используемых в лаборатории, имеется. Исследование цепей несинусоидального тока охватывает и некоторые другие изучавшиеся ранее студентами вопросы (принцип суперпозиции, амплитудное и действующее значение сигнала, фазовый сдвиг, фильтрующие свойства реактивных элементов, явление электрического резонанса), что способствует закреплению полученных ранее знаний. Поэтому задача подготовки такой лабораторной работы является весьма актуальной.

Лабораторный стенд «Основы электротехники и электроники» имеет в своем составе функциональный генератор, способный формировать следующие сигналы несинусоидальной формы:

– однополярный меандр;

– двухполярный меандр;

– сигнал треугольной формы.

Как вариант, можно еще последовательно с сигналом треугольной формы включить источник постоянного напряжения, сместив сигнал, например, в область положительных напряжений.

Амплитуда генерируемого сигнала может быть установлена в диапазоне от 0 до 10 В, а частота – в диапазоне от 10 Гц до 1 МГц.

Рассмотрим возможные варианты схем с периодическим несинусоидальным источником для исследования в лабораторной работе, ограничившись для упрощения расчетов, предваряющих лабораторные исследования, минимально возможным количеством элементов в них. Предлагаются четыре основные схемы (рис. 1).

Первые две схемы позволяют за счет использования явлений резонанса напряжений (рис. 1, *а*) или резонанса токов (рис. 1, *б*) добиться, соответственно, выделения или подавления одной из гармоник спектра разложения в ряд Фурье несинусоидального сигнала функционального генератора [1–3].

При заданных величинах R, L, C в лабораторной работе требуется предварительно рассчитать резонансную частоту контура, затем

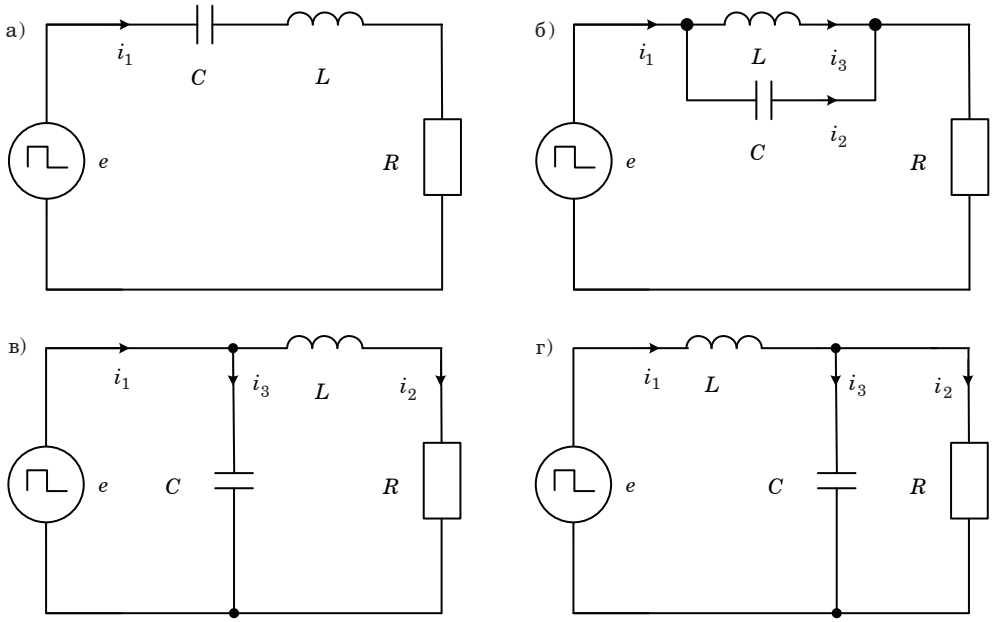


Рис. 1. Схемы с несинусоидальным источником: а – последовательный резонансный контур; б – параллельный резонансный контур; в – фильтр нижних частот 1; г – фильтр нижних частот 2

настроить функциональный генератор стенда на резонансную частоту для схемы (рис. 1, *а*) и убедиться, что высшие гармоники в спектре выходного сигнала сильно подавлены.

Для схемы (рис. 1, *б*) целесообразно добиться подавления за счет резонанса токов высшей гармоники с наибольшей амплитудой, например, при имеющихся в распоряжении разновидностях сигналов несинусоидального периодического напряжения – третьей гармоники. Для этого следует настроить функциональный генератор на частоту, равную $^1/_3$ от резонансной.

Схемы (рис. 1, *в*, *г*) представляют собой электрические фильтры нижних частот, поэтому в выходном сигнале, снимаемом с активного сопротивления, будут частично подавлены высшие гармоники входного несинусоидального сигнала.

Перед выполнением лабораторных исследований по любой из предложенных схем студентам необходимо выполнить предварительный расчет и моделирование схемы в программе Multisim.

Выполним расчет одной из схем (рис. 1, *г*) со следующими параметрами: R = 100 Ом, L = 0,28 Гн, C = 22 мкФ. Источник периодического несинусоидального напряжения – однополярный меандр (рис. 2). Разложение этого сигнала в ряд Фурье описывается выражением:

$$u(t) = \frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi}(\sin\omega t + \frac{1}{3}\sin 3\omega t + \frac{1}{5}\sin 5\omega t + \ldots). \quad (1)$$

Выберем амплитуду меандра равной $A = 5$ В. Определим по рис. 2 величину постоянной составляющей (2,5 В), круговую частоту первой гармоники ($\omega = 2\pi/T = 628$ 1/с) и рассчитаем частоту третьей гармоники ($3\omega = 3 \cdot 2\pi/T = 1884$ 1/с). При дальнейшем расчете ограничимся только двумя высшими гармониками.

На основе разложения в ряд Фурье (1) запишем мгновенное значение входного напряжения:

$$u_1(t) = 2{,}5 + 3{,}18\sin 628t + 1{,}06\sin 1884t + \ldots \quad (2)$$

Постоянная составляющая и комплексные действующие значения гармоник входного напряжения:

$$U_1^{(0)} = 2{,}5\,\text{В},\ \dot{U}_1^{(1)} = \frac{3{,}18}{\sqrt{2}} = 2{,}25\,\text{В},$$

$$\dot{U}_1^{(3)} = \frac{1{,}06}{\sqrt{2}} = 0{,}75\,\text{В}.$$

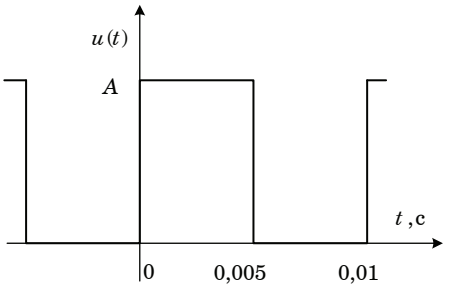


Рис. 2. Форма напряжения несинусоидального источника

Вычислим входное сопротивление цепи для каждой из гармоник. Комплексная схема замещения цепи (рис. 1, *г*) приведена на рис. 3.

Учитывая свойства реактивных элементов при постоянном токе, по схеме замещения (рис. 4) определим сопротивления цепи для постоянной составляющей (нулевой гармоники):

$$\underline{Z}_1^{(0)} = 0\,\text{Ом},\ \ Z_3^{(0)} = \infty,\ \underline{Z}_2^{(0)} = R = 100\,\text{Ом}.$$

Тогда входное сопротивление цепи постоянному току:

$$\underline{Z}_{\text{вх}}^{(0)} = \underline{Z}_1^{(0)} + \underline{Z}_2^{(0)} = 100\,\text{Ом}.$$

Найдем сопротивления цепи для первой гармоники по схеме замещения (рис. 5):

$$\underline{Z}_1^{(1)} = j\omega L = j628 \cdot 0{,}28 = j176\ \text{Ом},$$

$$\underline{Z}_3^{(1)} = -j\frac{1}{\omega C} = -j\frac{1}{628 \cdot 22 \cdot 10^{-6}} = -j72\ \text{Ом},$$

$$\underline{Z}_2^{(1)} = R = 100\ \text{Ом}.$$

$$\underline{Z}_{\text{вх}}^{(1)} = \underline{Z}_1^{(1)} + \frac{\underline{Z}_3^{(1)} \cdot \underline{Z}_2^{(1)}}{\underline{Z}_3^{(1)} + \underline{Z}_2^{(1)}} = j176 + \frac{-j72 \cdot 100}{-j72 + 100} =$$

$$= 34 + j129 = 133e^{j75^\circ}\ \text{Ом}.$$

Для третьей гармоники по схеме замещения (рис. 6) найдем:

$$\underline{Z}_1^{(3)} = j3\omega L = j3 \cdot 628 \cdot 0.28 = j528\,\text{Ом},$$

$$\underline{Z}_3^{(3)} = \frac{1}{j3\omega C} = \frac{1}{j3 \cdot 628 \cdot 22 \cdot 10^{-6}} = -j24\,\text{Ом};$$

$$\underline{Z}_2^{(3)} = R = 100\,\text{Ом}.$$

$$\underline{Z}_{\text{вх}}^{(3)} = \underline{Z}_1^{(3)} + \frac{\underline{Z}_3^{(3)} \cdot \underline{Z}_2^{(3)}}{\underline{Z}_3^{(3)} + \underline{Z}_2^{(3)}} = j528 + \frac{-j24 \cdot 100}{-j24 + 100} =$$

$$= 5 + j505 = 505e^{j89^\circ}\,\text{Ом}.$$

Выполним расчет токов в ветвях и напряжения U2 на выходе схемы.

Постоянная составляющая входного тока:

$$I_1^{(0)} = \frac{U_1^{(0)}}{\underline{Z}_{\text{вх}}^{(0)}} = \frac{2{,}5}{100} = 25\,\text{мА},$$

его первая и третья гармоники в комплексной форме:

$$\dot{I}_1^{(1)} = \frac{\dot{U}_1^{(1)}}{\underline{Z}_{\text{вх}}^{(1)}} = \frac{2{,}25}{133e^{j75^\circ}} = 17e^{-j75^\circ}\,\text{мА},$$

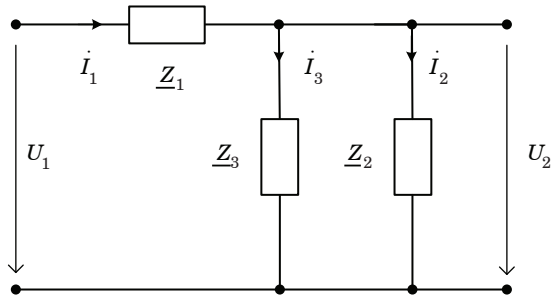


Рис. 3. Комплексная схема замещения цепи

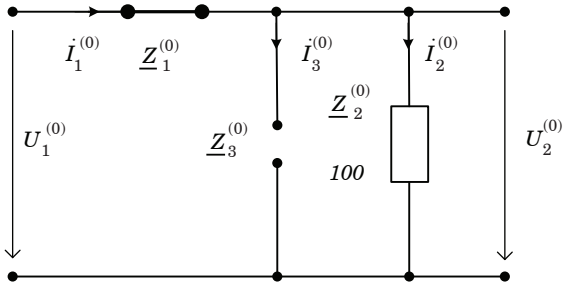


Рис. 4. Комплексная схема замещения для постоянной составляющей напряжения источника

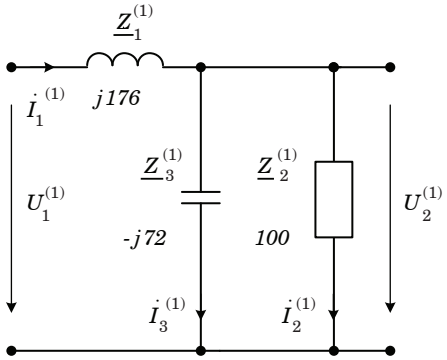


Рис. 5. Комплексная схема замещения для первой гармоники напряжения источника

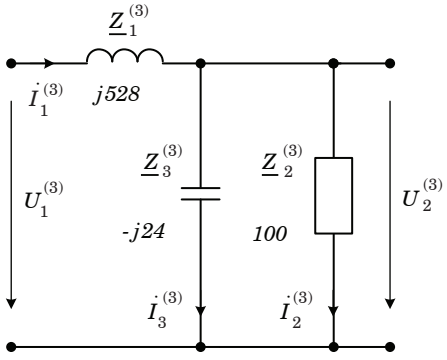


Рис. 6. Комплексная схема замещения для третьей гармоники напряжения источника

$$\dot{I}_1^{(3)} = \frac{\dot{U}_1^{(3)}}{\underline{Z}_{\text{вх}}^{(3)}} = \frac{0,75}{505e^{j89^\circ}} = 1,5e^{-j^{89^\circ}} \text{ мА.}$$

Постоянная составляющая тока третьей ветви, его первая и третья гармоники:

$$I_3^{(0)} = 0\,\text{А}, \qquad \dot{I}_3{}^{(1)} = \dot{I}_1^{(1)} \frac{\underline{Z}_2^{(1)}}{\underline{Z}_3^{(1)} + \underline{Z}_2^{(1)}} =$$

$$= 0,017e^{-j^{75^\circ}} \left(\frac{100}{-j72 + 100} \right) = 14e^{-j^{40^\circ}} \text{ мА},$$

$$\dot{I}_3{}^{(3)} = \dot{I}_1^{(3)} \frac{\underline{Z}_2^{(3)}}{\underline{Z}_3^{(3)} + \underline{Z}_2^{(3)}} =$$

$$= 0,0015e^{-j89} \left(\frac{100}{-j24 + 100} \right) = 1,5e^{-j^{76^\circ}} \text{ мА.}$$

Постоянная составляющая тока второй ветви, его первая и третья гармоники:

$$\dot{I}_2{}^{(0)} = \dot{I}_1{}^{(0)} = 25\,\text{мА}, \; \dot{I}_2{}^{(1)} = \dot{I}_1^{(1)} \frac{\underline{Z}_3^{(1)}}{\underline{Z}_3^{(1)} + \underline{Z}_2^{(1)}} =$$

$$= 0,017e^{-j^{75^\circ}} \left(\frac{-j72}{-j72 + 100} \right) = 10e^{-j^{129^\circ}} \text{ мА},$$

$$\dot{I}_2{}^{(3)} = \dot{I}_1^{(3)} \frac{\underline{Z}_3^{(3)}}{\underline{Z}_3^{(3)} + \underline{Z}_2^{(3)}} =$$

$$= 0,0015e^{-j^{89^\circ}} \left(\frac{-j24}{-j24 + 100} \right) = 0,36e^{j^{-166}} \text{ мА.}$$

При правильном расчете токов должен выполняться закон токов Кирхгофа в комплексной форме для каждой из гармоник:

$$\dot{I}_1{}^{(0)} = \dot{I}_2{}^{(0)} + \dot{I}_3{}^{(0)}; \; \dot{I}_1{}^{(1)} = \dot{I}_2{}^{(1)} + \dot{I}_3{}^{(1)};$$

$$\dot{I}_1{}^{(3)} = \dot{I}_2{}^{(3)} + \dot{I}_3{}^{(3)}. \qquad (3)$$

Определим постоянную составляющую выходного напряжения, его первую и третью гармоники:

$$U_2^{(0)} = RI_2^{(0)} = 100 \cdot 0,025 = 2,5\,\text{В};$$

$$\dot{U}_2^{(1)} = R\dot{I}_2^{(1)} = 100 \cdot 0,01e^{-j^{129^\circ}} = 1,0e^{-j^{129^\circ}} \text{ В};$$

$$\dot{U}_2^{(3)} = R\dot{I}_2^{(3)} = 100 \cdot 0,0003e^{-j^{166^\circ}} = 0,03e^{-j^{166^\circ}} \text{ В}. \qquad (4)$$

Используя рассчитанные величины (4), запишем мгновенное значение выходного напряжения:

$$u_2(t) = 2,5 + \sqrt{2}\sin(628t - 129^\circ) +$$

$$+0,03\sqrt{2}\sin(1884t - 166^\circ), \text{В}. \qquad (5)$$

Для моделирования работы схемы в Multisim [4] необходимо представить источник несинусоидального напряжения в виде суммы последовательно включенных источников напряжения, соответствующих каждой из учитываемых гармоник входного сигнала (рис. 7). При выбранном

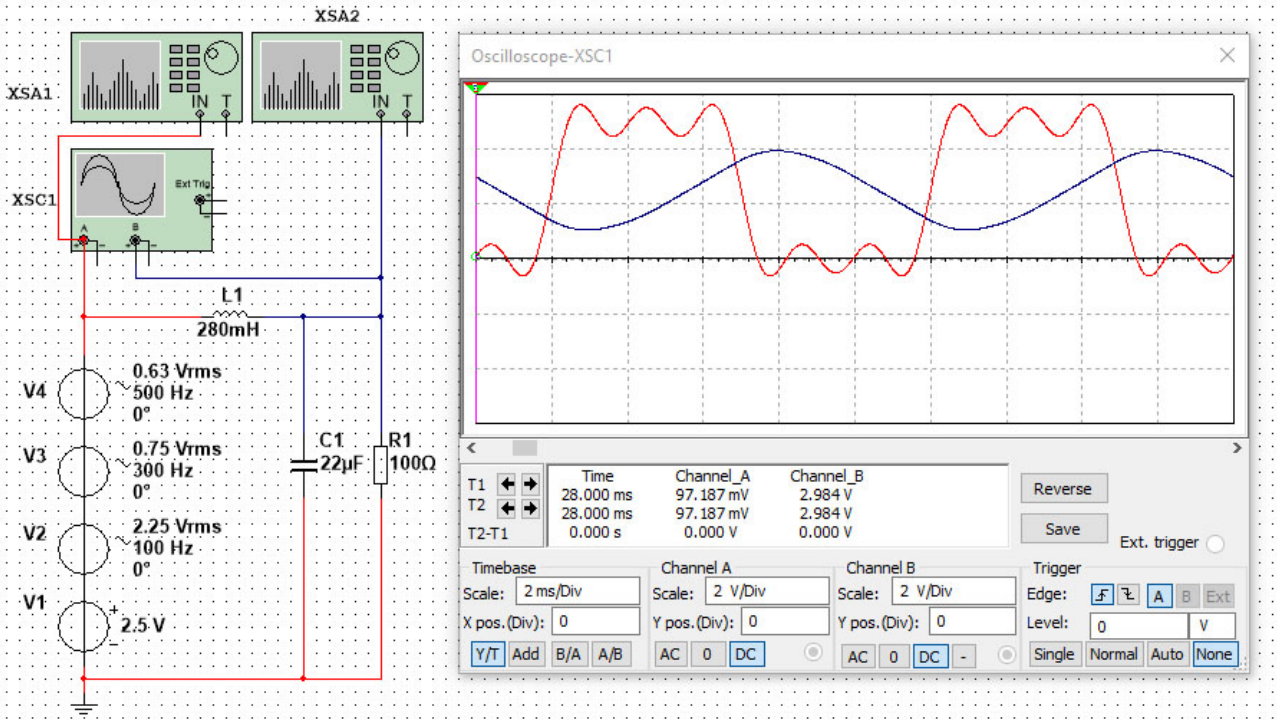


Рис. 7. Моделирование цепи с несинусоидальным источником в Multisim

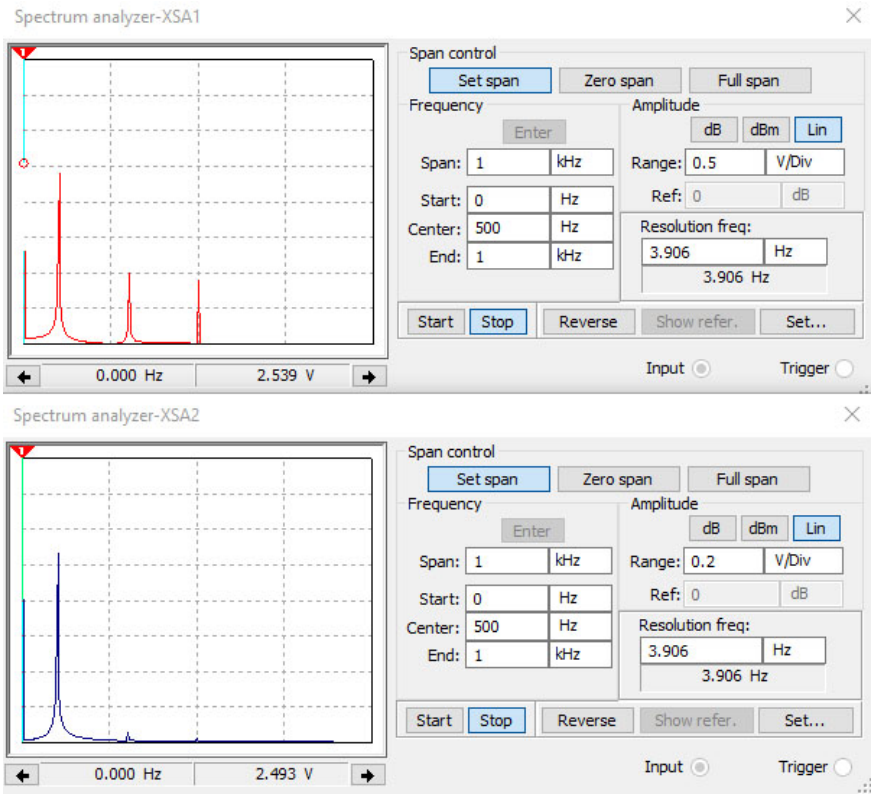


Рис. 8. Спектральный состав входного и выходного сигнала

количестве высших гармоник с учетом источника, учитывающего постоянную составляющую, входной сигнал напоминает по форме однополярный меандр. Форма выходного напряжения близка к расчетному выражению (5) для $u_2(t)$. Спектральный состав входного и выходного сигнала (рис. 8) соответствует расчетным значениям амплитуд гармоник. При изменении значения частоты входного несинусоидального сигнала спектральный состав выходного сигнала может быть более ярко выраженным.

Выполнив предварительный расчет с заданными параметрами сигнала и исследуемой цепи, промоделировав работу схемы в Multisim, студенты имеют возможность сравнить результаты расчета и моделирования, а затем приступить к натурному эксперименту, подтвердив правильность расчетов. Приемлемым результатом выполнения лабораторной работы является схожесть осциллограммы напряжения на сопротивлении нагрузки и результата моделирования в Multisim.

Таким образом, предложенные варианты схем могут быть использованы в лабораторном практикуме по «Электротехнике» при изучении цепей периодического несинусоидального тока. При минимальной сложности рассмотренных схем они дают возможность попрактиковаться в их расчете, моделировании и экспериментальном исследовании.

Список источников

1. Электротехника: лабораторный практикум / С. И. Бардинский [и др.]. СПб.: ГУАП, 2017. 190 с.

2. Расчет электрических цепей. Ч. 1 / В. А. Голубков [и др.]. СПб.: ГУАП, 2018. 59 с.

3. *Ефимов А. А., Мельников С. Ю.* Расчет электрических цепей. Ч. 3. СПб.: ГУАП, 2021. 74 с.

4. *Шестеркин А. Н.* Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10. М.: ДМК Пресс, 2012. 360 с.

УДК 681.58

А. М. Рулёв*
студент
А. К. Попов*
студент
И. Г. Криволапчук*
старший преподаватель
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МОДЕРНИЗАЦИЯ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТЕНДА «СЛЕДЯЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД АНТЕННЫ РЛС»

Рассматриваются подходы к модернизации учебно-исследовательского стенда для изучения следящего электропривода. Приводятся результаты исследования существующего стенда и полученные математические модели.
Ключевые слова: *электропривод, радиолокационная станция, следящие системы, система автоматического управления, имитационное моделирование, учебный стенд.*

A. M. Rulev*
Student
A. K. Popov*
Student
I. G. Krivolapchuk*
Senior Lecturer
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

MODERNIZATION OF THE EDUCATIONAL AND RESEARCH PLANT "TRACKING ELECTRIC DRIVE OF THE RADAR ANTENNA"

Approaches to modernizing the educational and research stand for studying the servo electric drive are considered. The results of the study of the existing stand and the resulting mathematical models are presented.
Keywords: *electric drive, radar station, tracking systems, automatic control system, simulation modeling, training stand.*

Традиции инженерного образования предполагают, что процесс обучения включает в себя, кроме теоретических курсов и выполнения различных расчетных заданий, непосредственное изучение элементов, узлов и систем с которыми будущий инженер столкнется в профессиональной деятельности. Экспериментально-практическая часть обучения, как правило, проводится в рамках лабораторных курсов дисциплин с использованием специализированных стендов промышленного изготовления или разработанных в самом учебном заведении.

Во многих инженерных вузах в настоящее время еще сохраняется в эксплуатации значительное количество лабораторного оборудования, практически выработавшего ресурс и часто имеющего существенно ограниченный функционал, которое невозможно заменить в силу несоответствия выпускаемых промышленностью учебных комплектов предъявляемым требованиям. В частности, подобная ситуация наблюдается в отношении лабораторного оборудования, предназначенного для обеспечения дисциплин, связанных или базирующихся на теории автоматического управления.

Выпускаемое оборудование ориентировано или на изучение азов теории управления, или представляет собой достаточно узкоспециализированные иженерные тренажеры, предназначенные для изучения конкретного промышленного оборудования [1]. К недостаткам также можно отнести определенную закрытость лабораторных стендов, не позволяющую выйти за рамки предлагаемых производителями перечней лабораторных работ. В работе [2] рассмотрены некоторые проекты учебных стендов для исследования следящих электроприводов с точ-

ки зрения устранения указанных недостатков. Таким образом, можно сделать вывод, что сохраняется актуальность разработки учебных стендов исследовательского направления, которые не предлагают изучения готовых решений, а оставляют определенную свободу действий обучающимся в рамках учебной задачи.

Одним из возможных путей при создании учебно-исследовательского стенда может стать модернизация ранее существовавших, разработанных с учетом локальных требований. Такой подход будет особенно оправдан в случае использования в качестве базы образцов реального оборудования. В рассматриваемом случае в качестве такого оборудования выступает один из блоков бортовой самолетной радиолокационной станции (РЛС) – 3-координатный следящий электропривод антенны (рис. 1).

Рис. 1. Антенна РЛС с системой подвижности

Радиолокационная станция предупреждения столкновений и навигации типа РПСН-2Н(-3Н) [3] устанавливалась на борту транспортных самолетов таких типов, как, например, Ил-18 и Ан-24. РЛС предназначена для обеспечения безопасности полетов в сложных метеоусловиях, в зонах с интенсивным воздушным движением, в районах с сильно пересеченной местностью путем предупреждения экипажа от столкновений с воздушными и наземными препятствиями. Кроме того, РЛС позволяет решать ряд навигационных задач:

– вести обзор пролетаемой местности с целью ведения ориентировки;

– определять место самолета;

– определять угол сноса и путевую скорость.

В задачи электропривода антенны входят обеспечение рабочего движения (сканирования) по углу азимута, гироскопическая стабилизация плоскости луча при пространственных эволюциях носителя, а также ручное управление поворотом антенны в азимутальной плоскости и регулировка наклона по продольному крену (тангажу).

Привод обеспечивает зону обзора станции (±90)° по азимуту от продольной оси самолета при частоте автоматического качания антенны 20 циклов в минуту. Гиростабилизация обеспечивается в диапазоне углов (±20)° по крену при скорости не более 15°/с и (±10)° в канале тангажа при скоростях изменения угла тангажа не более 5°/с. Максимальная ошибка при этом не превышает величины 1°30'. Возможные углы поворота антенны дистанционно вручную составляют (±10)° относительно горизонтальной плоскости и (±20)° по углу азимута.

Структурная схема исследуемой системы приведена на рис. 2. Как видно из схемы, система включает в себя три канала, два из которых – азимутальный и крена – являются независимыми, а третий – канал тангажа – связан с азимутальным по входу. Таким образом, исследуемый электропривод представляет собой образец простой многосвязной системы.

Все три канала следящей системы, работающей на переменном токе, построены по практически идентичным схемам, а имеющиеся отличия определяются функциональным назначением каналов. Усилительный тракт состоит из предварительного усилителя (УН) и усилителя мощности (УМ), нагрузкой которого служит обмотка управления двухфазного исполнительного двигателя (ДВ). Предварительный усилитель построен по двухтактной схеме на основе электронной лампы – двойного триода. В его задачи входят суммирование задающего сигнала и сигнала обратной связи и усиление результирующего сигнала до уровня, обеспечивающего работу усилителя мощности. В качестве усилителя мощности применяется двухтактный магнитный усилитель с выходом на переменном токе, построенный по мостовой схеме. Так как используемый магнитный усилитель управляется постоянным током, между УН и УМ в качестве согласующего элемента используется фазочувствительный выпрямитель (ФЧВ), конструктивно совмещенный с УМ.

Следящая система по каналу азимута (I канал) задействована только в режимах ручного управления – при определении угла сноса и путевой скорости. Сканирование осуществляется за счет перекоммутации фазы питающего напряжения механическим переключателем. Управляющий сигнал формируется сельсинной парой (Д1), работающей в трансформаторном режиме. Сельсин-датчик (СД) установлен на пульте штурмана и служит для задания поло-

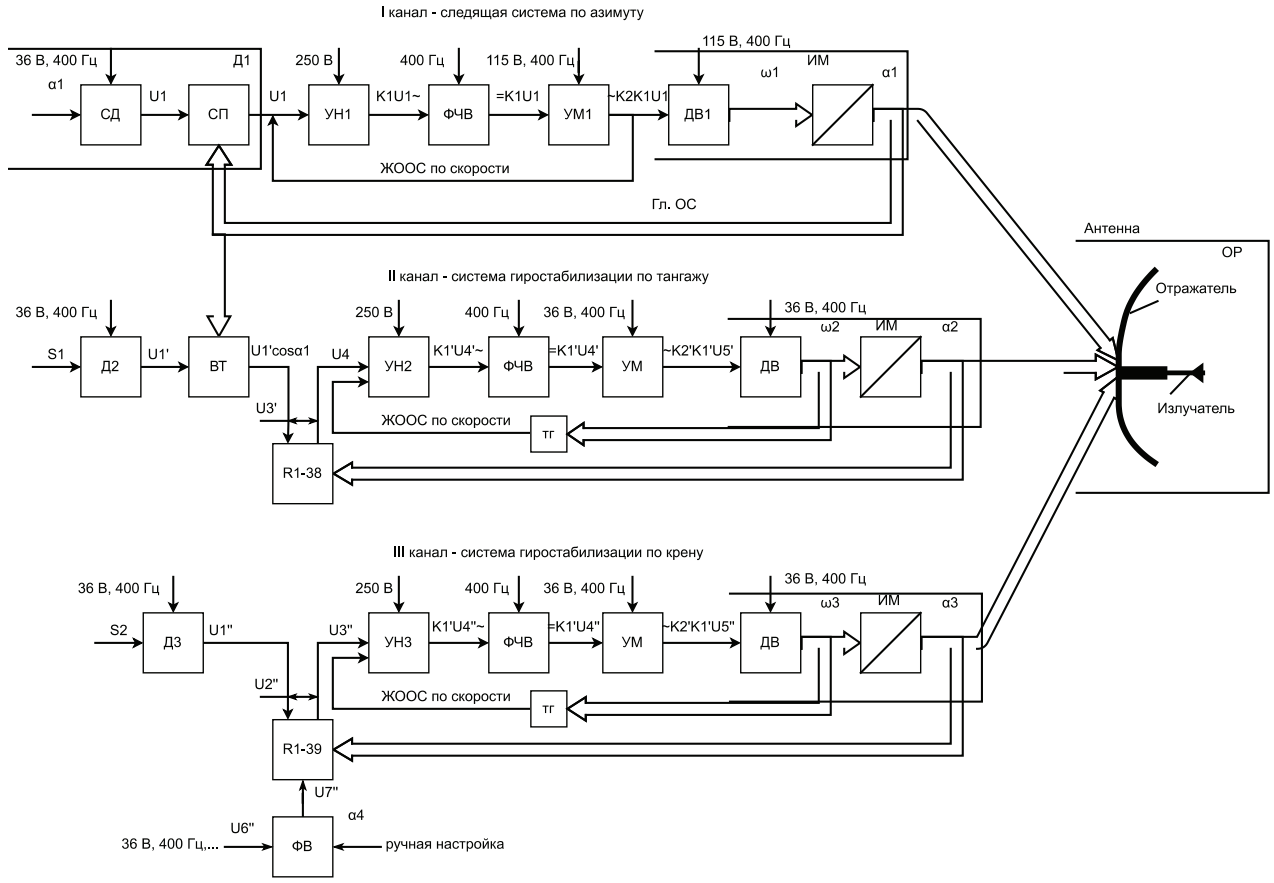


Рис. 2. Структурная схема антенного блока РЛС

жения антенны, сельсин-приемник (СП) кинематически связан с азимутальной осью вращения антенны и является элементом главной обратной связи. Устойчивость системы обеспечивается за счет контура жесткой отрицательной обратной связи (ЖООС) по скорости, сигнал которого формируется тахометрическим мостом, подключенным к выходу УМ.

В канале гиростабилизации по крену (III канал) в качестве источника управляющего сигнала выступает центральная гировертикаль (ЦГВ) самолета [4]. Сигнал с датчика крена Д3 в ЦГВ суммируется с сигналом датчика отработки, в качестве которого выступает индукционный потенциометр R1-39. ЖООС обеспечивается сигналом встроенного в исполнительный двигатель тахогенератора (ТГ).

Канал гиростабилизации по тангажу (II канал) имеет наиболее сложную схему формирования сигнала управления. Сигнал с датчика тангажа Д2 ЦГВ поступает на решающий вращающийся трансформатор (ВТ), где формируется сигнал, зависящий не только от угла тангажа, но и от угла поворота антенны по азимуту:

$$U_3 = U_1 \cos \alpha_1,$$

где U_1 – сигнал датчик тангажа; α_1 – угол поворота антенны относительно продольной оси самолета. Полученный сигнал далее суммируется с сигналом датчика отработки на индукционном потенциометре R1-38. Сигнал ЖООС, как и в канале крена, поступает от встроенного ТГ.

Питание системы осуществляется от бортовой сети переменного тока 400 Гц 36 В (датчики) и 115 В (усилители и двигатели). Поскольку питающие сети являются физически разными и не согласованными как по фазе, так и, в общем случае, по частоте, а процессы в электроприводе переменного тока определяются во многом фазовыми соотношениями сигналов, то упомянутые ранее ФЧВ могут рассматриваться как устройства согласования фазы между измерительной и силовой частями привода.

Существовавшая ранее версия учебно-исследовательского стенда [5] была разработана на основе следящей системы канала азимута с использованием оригинальных элементов усилительного тракта. Незначительной модификации подверглась электромеханическая часть – к исполнительному двигателю был добавлен тахогенератор, заменивший впоследствии тахометрический мост. В рамках лабораторных ис-

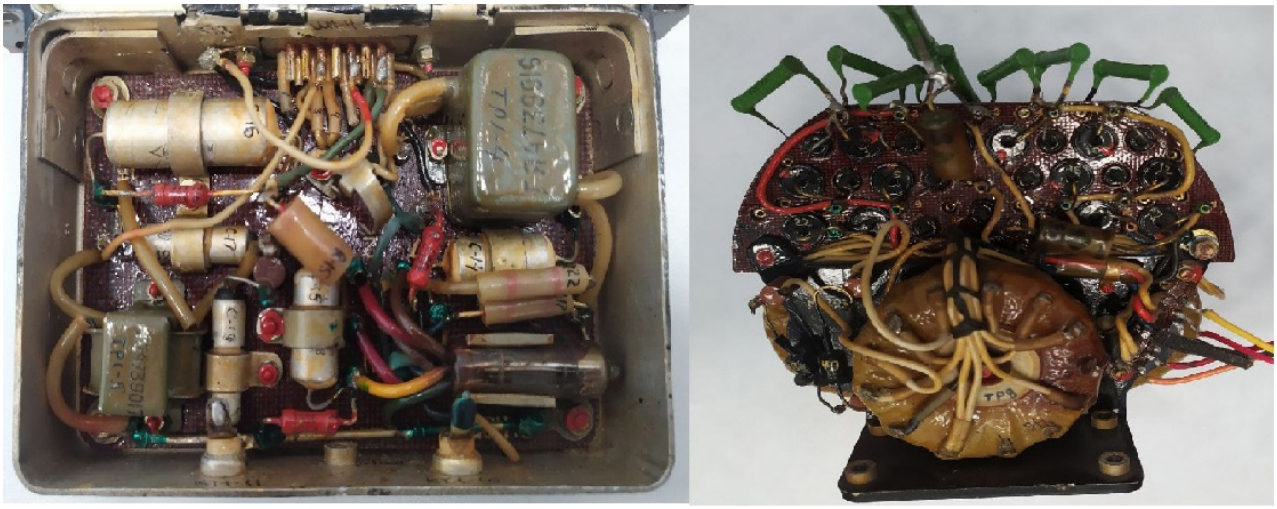


Рис. 3. Электронный и магнитный усилители канала азимута

следований было доступно исследование статических характеристик части элементов системы и расчет цепи обратной связи для придания системе заданных показателей качества.

Предварительное обследование электромеханической части системы показало, что элементы каналов крена и тангажа присутствуют в полном объеме и являются условно исправными, что позволило сформулировать предложения по модернизации лабораторной установки с существенным расширением её функциональных возможностей. Так, при задействовании двух новых каналов появляется возможность изучения поведения следящей системы при наличии возмущающего воздействия (канал тангажа или крена) и знакомство с функционированием многосвязной системы (при совместной работе канала азимута и тангажа).

Работа по модернизации предполагает практически полное перепроектирование усилительно-преобразовательной части системы. В частности, необходимо решить проблему питания электромеханических узлов при максимальном, по возможности, сохранении их характеристик. Так как техническое описание [3] не позволяет получить необходимые характеристики отдельных элементов электропривода, было произведено исследование имеющихся блоков, по результатам которого были построены имитационные и математические модели.

Как отмечалось выше, усилители каналов состоят из двух компонентов – электронного и магнитного усилителей (рис. 3). При их исследовании необходимо определить коэффициенты передачи, примерный диапазон входных сигналов, гарантирующий работу в линейной области, и, для магнитного усилителя, постоянную времени. На основе принципиальной схемы электронного усилителя также была построена SPICE-модель в пакете NI Multisim (рис. 4).

Необходимость такой модели объясняется отсутствием возможности исследовать реальные усилители каналов крена и тангажа, имеющие некоторые схемные отличия. При адекватных результатах моделирования результаты можно распространить и на эти каналы.

Сравнение результатов моделирования и измерения выходного сигнала реального усилителя (рис. 5) показывают хорошее совпадение, что позволяет сделать вывод о применимости модели в дальнейшей работе.

На рис. 6 показаны результаты испытания магнитного усилителя. Как видно из графиков, усилитель обладает достаточно большой постоянной времени (0,07 с), но при этом обладает высокой линейностью в рабочем диапазоне входных сигналов. Таким образом, он может быть описан передаточной функцией

$$W_{\text{МУ}}(s) = \frac{K_{\text{МУ}}}{T_{\text{МУ}}s + 1} = \frac{46}{0{,}07s + 1}. \qquad (1)$$

Передаточная функция асинхронного двухфазного двигателя по углу поворота может быть аппроксимирована апериодическим звеном первого порядка [6]:

$$W_{\text{ДВ}}(s) = \frac{K_{\text{ДВ}}}{(T_{\text{ЭМ}}s + 1)s}, \qquad (2)$$

где $K_{\text{ДВ}}$ – коэффициент передачи исполнительного двигателя; $T_{\text{ЭМ}}$ – электромеханическая по-

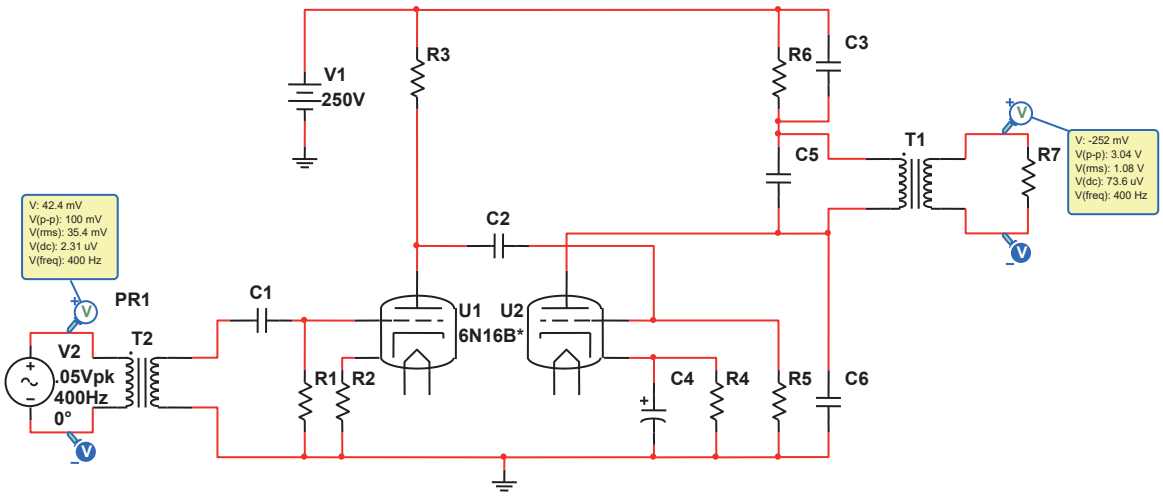


Рис. 4. Multisim-модель электронного усилителя

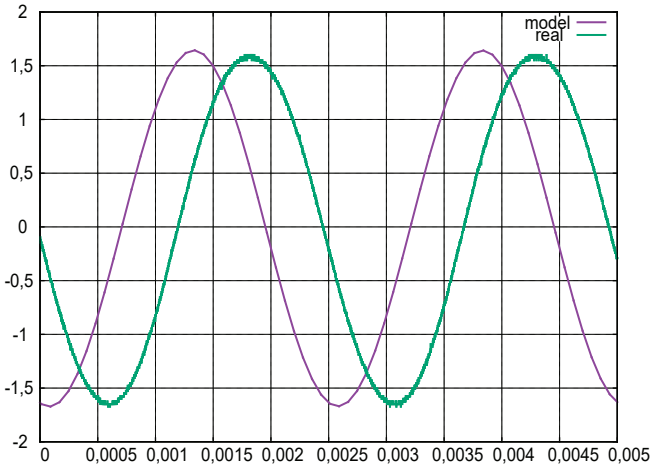


Рис. 5. Сравнение сигналов модели и реального усилителя

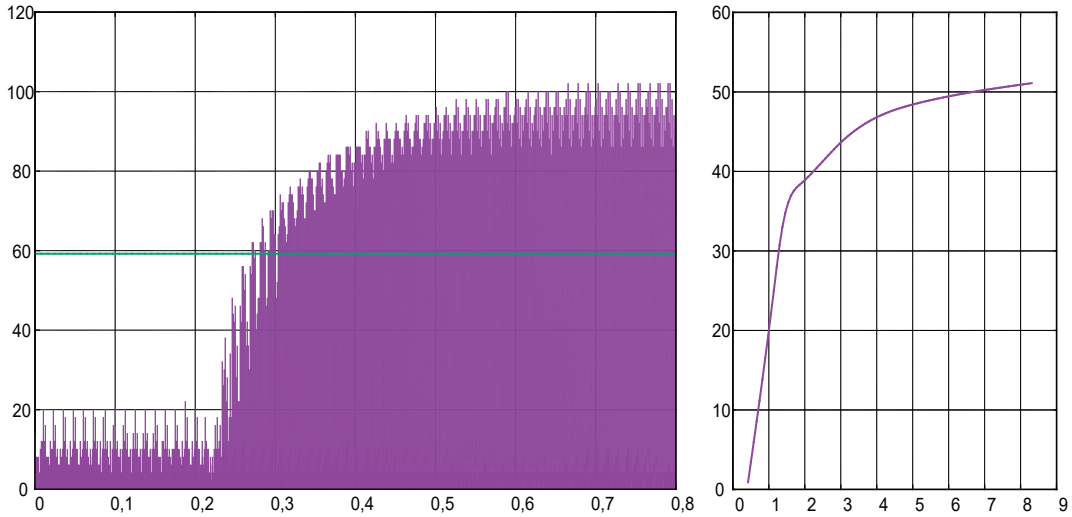


Рис. 6. Динамическая и статическая характеристики магнитного усилителя

стоянная времени двигателя, учитывающая также нагрузку. Коэффициент передачи может быть рассчитан по следующему выражению на основе паспортных данных:

$$K_{\text{ДВ}} = \frac{M_{\text{П}}\Omega_{\text{Н}}}{(M_{\text{П}} - M_{\text{Н}})U_{\text{Н}}}, \quad (3)$$

где $M_{\text{Н}}$ и $M_{\text{П}}$ – номинальный и пусковой моменты двигателя соответственно; $\Omega_{\text{Н}}$ – номинальная скорость; $U_{\text{Н}}$ – номинальное напряжение обмотки управления соответственно.

Для применяемых в приводе двигателей типа ЭМ-25 (канал азимута), ДГ-5А (канал крена) и ДГ-3А (канал тангажа) [7] получаются следующие значения:

$$K_{\text{ЭМ25}}=27\ \text{В}^{-1},\ K_{\text{ДГ-5А}}=40\ \text{В}^{-1},$$
$$K_{\text{ДГ-3А}}=60\ \text{В}^{-1}.$$

Определение постоянных времени в каждом из каналов может быть произведено только на основе эксперимента, так как сложность конструкции исключает аналитический метод. На рис. 7; 8 показаны диаграммы разгона двигателей по всем трем каналам.

Полученные результаты позволяют определить приближенные значения постоянных времени во всех каналах:

$$T_{\text{ЭМ25}} = 0{,}47\ \text{с},\ T_{\text{ДГ-5А}} = 0{,}39\ \text{с},\ T_{\text{ДГ-3А}} = 0{,}07\ \text{с}.$$

Тогда передаточные функции исполнительных механизмов с учетом передаточных чисел редукторов примут вид:

$$K_I = \frac{27}{(0{,}47s+1)s}\cdot\frac{1}{300},\ K_{II} = \frac{40}{(0{,}39s+1)s}\cdot\frac{1}{1703},$$

$$K_{III} = \frac{60}{(0{,}07s+1)s}\cdot\frac{1}{1821}. \quad (4)$$

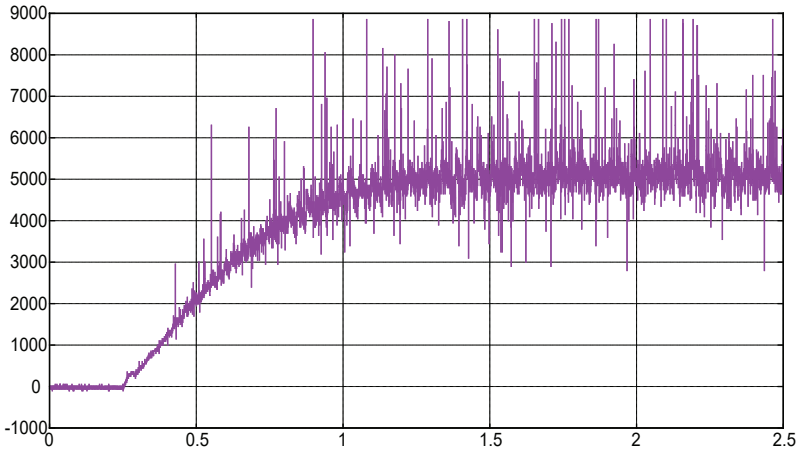


Рис. 7. Диаграмма разгона двигателя ЭМ-25

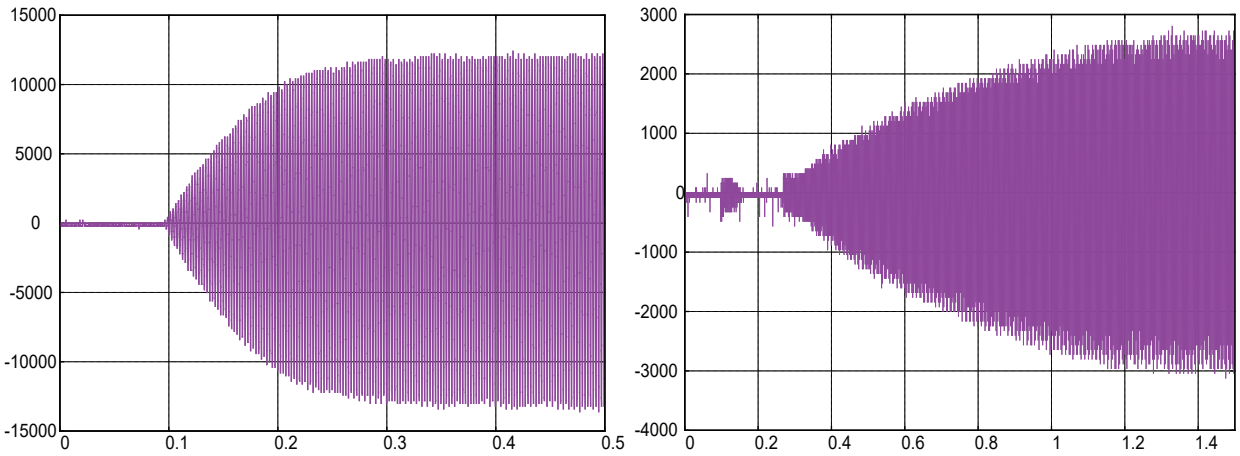


Рис. 8. Диаграммы разгона двигателей ДГ-5А и ДГ-3А

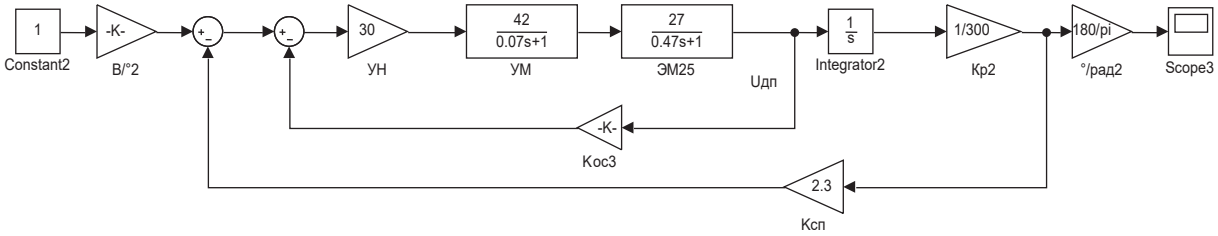


Рис. 9. Simulink-модель следящей системы канала азимута

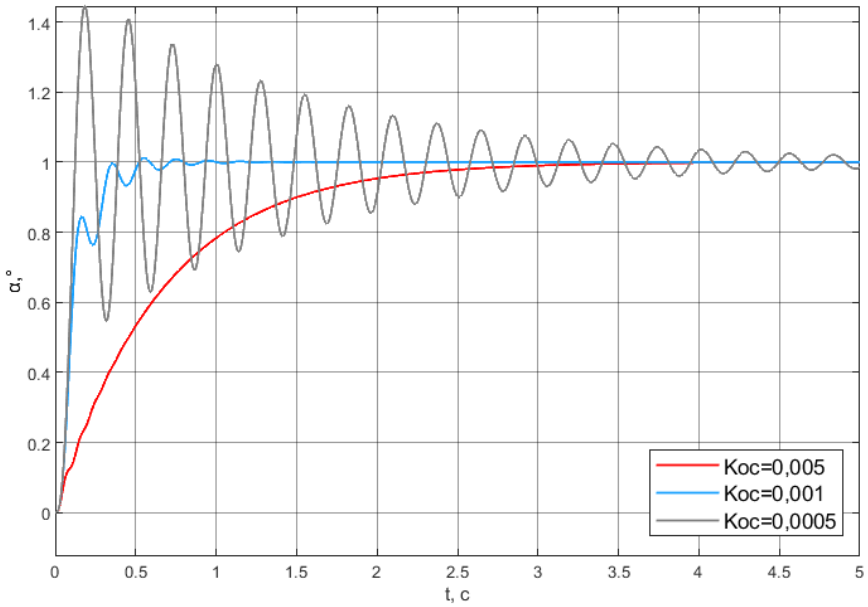


Рис. 10. Переходные процессы в системе

Теперь, с учетом коэффициентов передачи сельсин-пары (2,3 В/рад) и электронного усилителя (30), можно построить модель следящей системы канала азимута (рис. 9). Результаты моделирования для нескольких значений коэффициента ЖООС приведены на рис. 10.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о пригодности электромеханического блока в качестве основы для учебного стенда исследовательской направленности и могут служить отправным пунктом при разработке схемной реализации необходимых для обеспечения работоспособности стенда блоков.

Список источников

1. Учебное оборудование по направлению – Системы автоматического регулирования и управления. URL: https://labstand.ru/catalog/sistemy_avtomaticheskogo_regulirovaniya_i_upravleniya (дата обращения: 15.12.2023).

2. *Рулёв А. М., Попов А. К.* Обзор учебных стендов для исследования следящего электропривода // Современные научные исследования: теория, методология, практика. Уфа, 2022. С. 138–144.

3. Радиолокационная станция РПСН-2Н: техн. описание. М.: Оборонгиз, 1961. 110 с.

4. Центральная гироскопическая вертикаль ЦГВ-4: техн. описание и инструкция по монтажу и эксплуатации / В/О «Машприборинторг». М.: Внешторгиздат, 1967. 20 с.

5. Руководство к практикуму по курсу «Авиационный электропривод». Ч. 2: Регулируемый и следящий электропривод / Ленингр. ин-т авиац. приборостроения; сост. В. А. Андрющенко [и др.]. Л.: Изд-во ЛИАП, 1969. 54 с.

6. *Ломов В. С., Андрющенко В. А.* Проектирование авиационных следящих электроприводов. Линеаризованные системы: учеб. пособие / Ленингр. ин-т авиац. приборостроения. Л., 1970. 156 с.

7. Справочник по электрическим машинам: справ. изд. Т. 2 / ред. И. П. Копылов, Б. К. Клоков. М.: Энергоатомиздат, 1988. 688 с.

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-109-113**

М. А. Антонов*
студент
М. В. Сержантова*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ФИЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Рассматривается возможность применения фильтра Калмана для улучшения качества технического зрения. Данный фильтр, благодаря алгоритму предсказания и коррекции, возможно использовать для определения местоположения объекта в моменты, когда расположение объекта неопределимо.
Ключевые слова: *фильтр Калмана, машинное зрение, захват объекта.*

M. A. Antonov*
Student
M. V. Sergeantova*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

RESEARCH ON THE CAPABILITIES OF THE KALMAN FILTER TO IMPROVE THE QUALITY OF TECHNICAL VISION

The possibility of using a Kalman filter to improve the quality of technical vision is being considered. Thanks to the prediction and correction algorithm, this filter can be used to determine the location of an object at moments when the location of the object is indeterminable.
Keywords: *Kalman filter, machine vision, object capture.*

Введение

Цель работы состоит в рассмотрении использования фильтра Калмана для улучшения распознавания объектов в условиях недостаточной освещенности.

Отслеживание объекта является одной из основных задач машинного зрения и играет важную роль в различных сферах, таких как робототехника, автономные транспортные средства и системы безопасности. Для отслеживания объекта могут использоваться различные методы, такие как фильтрация Калмана, корреляция шаблонов и глубокое обучение. Выбор метода зависит от задачи и требований к точности и скорости.

Фильтр Калмана используется в техническом зрении для отслеживания координат объектов и оценки их состояния на основе видеопоследовательности изображений. Он широко используется для локализации и навигации роботов, а также в спутниковых навигационных системах. Для повышения эффективности и ускорения работы фильтра Калмана используется текущее положение объекта для предсказания его положения в следующем кадре [1].

Математическая модель

Фильтр Калмана позволяет рекурсивно доценивать вектор состояния динамической системы, основываясь на неполной или зашумленной последовательности данных для создания оценки состояния.

Математическая модель фильтра Калмана записывается в виде [2]:

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k,$$
$$z_k = H_k x_k + v_k,$$

где F_k – матрица размером $n \times n$, описывающая переход системы из состояния $k-1$ в k при отсутствии поступления новых данных; B_k – матрица $n \times m$, описывающая воздействие управляющего сигнала u_k на изменение состояния системы при переходе от состояния $k-1$ к состоянию k; m – размерность управляющего сигнала; H_k – матрица $c \times m$, описывающая переход состояния x_k в состояние z_k; c – размерность вектора наблюдения; w_k и v_k – представляют собой нормально распределенный шум при измерении состояния с матрицами ковариации Q_k и R_k.

Работа фильтра Калмана состоит их двух этапов – экстраполяции и коррекции [3].

1. Экстраполяция – предсказание вектора состояния системы, основываясь на векторе состояния текущей системы и примененному вектору управления.

2. На этапе коррекции вычисляется отклонение на шаге k, и вычисляется матрица коэффициентов усиления на основании ковариационных матриц имеющейся экстраполяции вектора состояния и полученных измерений. После чего выполняется коррекция ранее полученной экстраполяции вектора состояния, получение оценки вектора состояния системы и рассчитывается ковариационная матрица оценки вектора состояния системы.

Благодаря такому подходу фильтр Калмана возможно применять в задачах отслеживания, поскольку позволяет учитывать информацию не только из последнего кадра, но и информацию, полученную на протяжении отслеживания объекта. Вычисления происходят циклично [4].

Изображения состоят из большого массива данных, из-за чего их обработка требует большого количества ресурсов и делает затруднительным их обработку в реальном времени. В связи с чем для исследования работы фильтра Калмана видеопоследовательность предварительно фрагментируют на кадры и сегментируют. Исследование работы фильтра будет проходить на базе программы MatLab [5], поскольку данная программа позволяет реализовать функции как обработки видеозаписи, так и применения фильтра Калмана.

Моделирование

Для выполнения данной работы заранее был записан видеофайл (рис. 1). Разрешение видеофайла было выбрано 480 на 852 пикселей для ускорения работы алгоритмов определения объекта. На видеозаписи модель машинки движется по столу из одного края кадра в другой.

Модель, рассматриваемая в данной работе, линейна, управляющее воздействие отсутствует.

Для начала рассмотрим поведение фильтра в условиях, когда отследить объект можно на протяжении всего времени [6, 7]. На рис. 2; 3 продемонстрирован пример работы фильтра Калмана, где отдельные кружки показывают

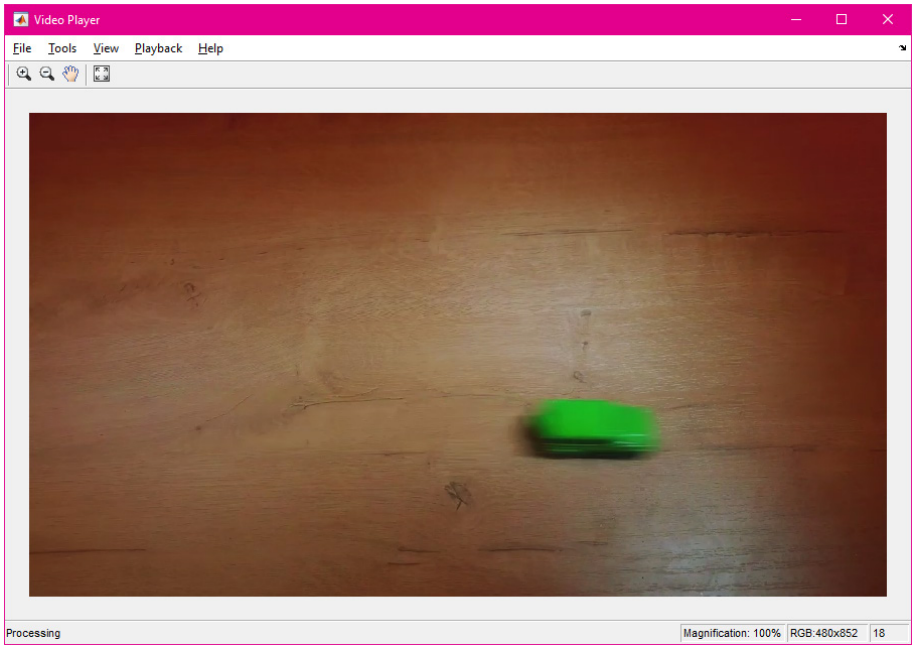


Рис. 1. Фрагмент исходной видеозаписи

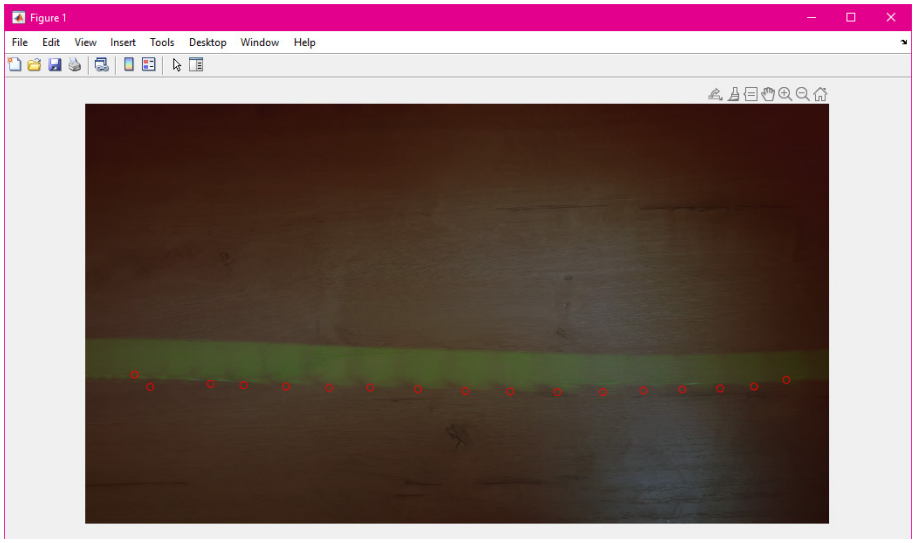


Рис. 2. Отслеживание положение объекта

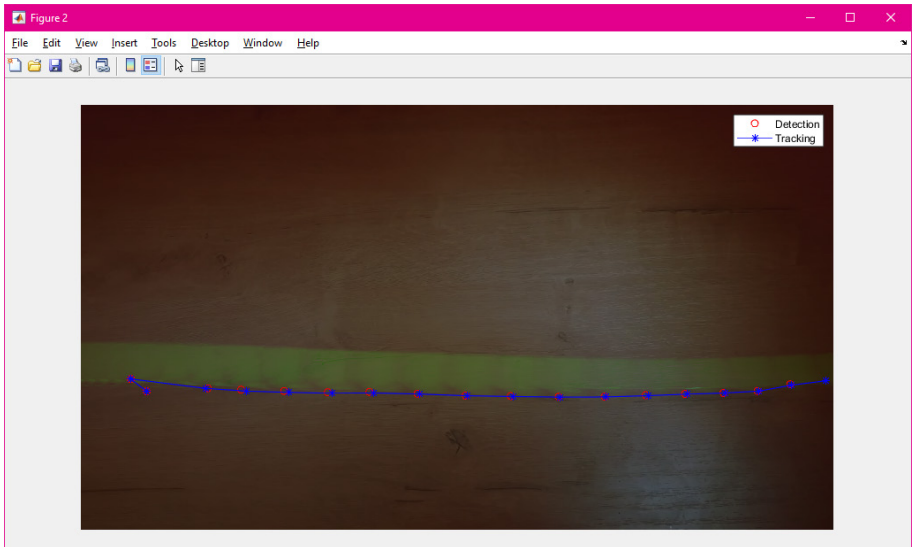


Рис. 3. Пример работы фильтра Калмана

распознанное положение машинки, а соединенные линией звездочки показывают предсказанное фильтром положение [8].

Далее рассмотрим видеозапись, на которой моделька автомобиля движется в условиях неравномерного уровня освещенности (рис. 4; 5). Такое освещение моделирует освещение на автомобильных дорогах с не плотно стоящими фонарными столбами. В рассматриваемом случае освещения достаточно для водителя, чтобы видеть дорогу, но недостаточно для алгоритмов технического зрения, поскольку уменьшение порога срабатывания приводит к появлению большого количества шумов [9].

Как и предполагалось, в области, где освещения недостаточно, распознать объект не удается.

Результаты эксперимента демонстрируют довольно точное прогнозирование положения объекта в области недостаточной освещенности. Несмотря на то, что модель распознавания объектов не была целью исследования, она требует улучшений, поскольку демонстрируют нестабильное поведение в моменты преодоления порога распознавания [10]. Это связано с постепенным появлением объекта в зоне с достаточной освещенностью, из-за чего менялся размер его зоны определения.

Дальнейшее использование фильтра Калмана в техническом зрении позволит увеличить точность распознавания объектов и уменьшить ошибку, связанную с условиями, в которых происходит захват изображения.

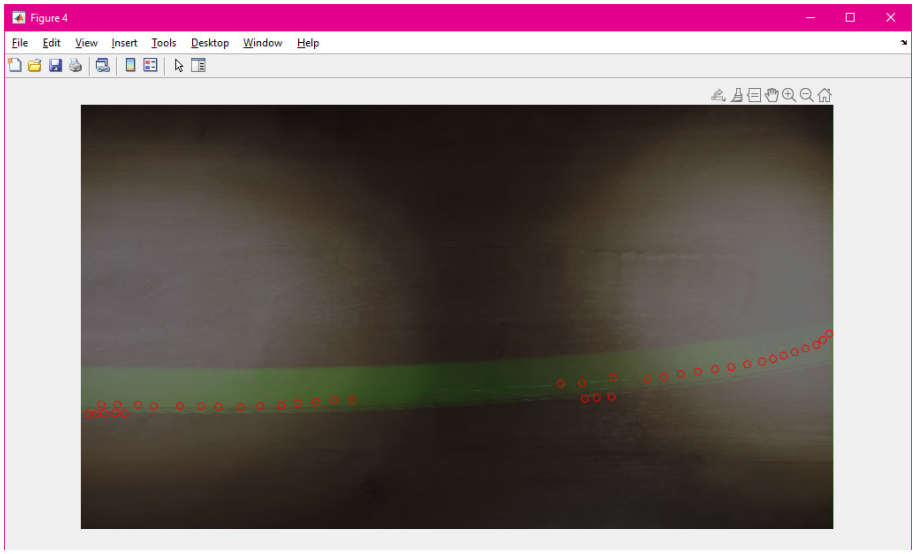


Рис. 4. Работа распознавания объекта в условиях неравномерной освещенности

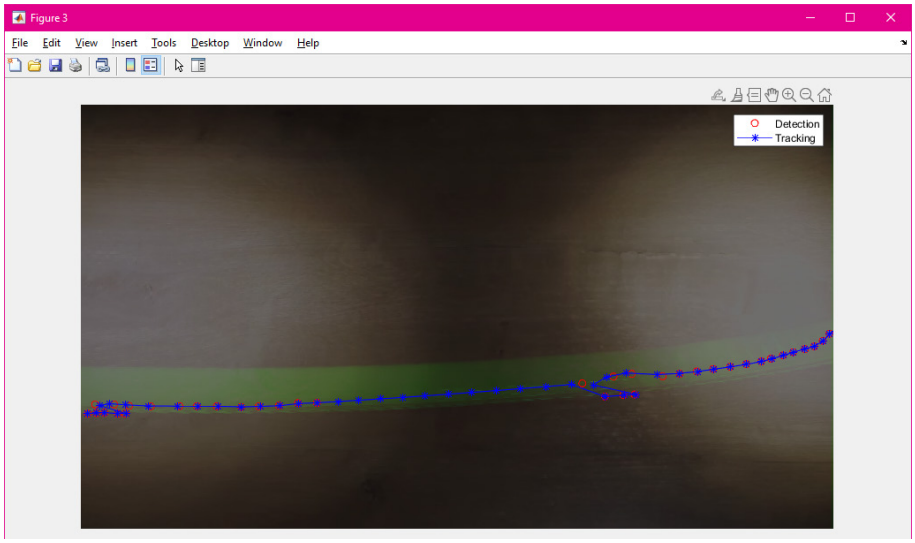


Рис. 5. Результат отслеживания и прогнозирования расположения объекта

Заключение

В данной работе были исследованы возможности фильтра Калмана для улучшения качества отслеживания объектов. Алгоритм использовался на видеозаписи с неравномерной освещенностью, что не позволяет отследить объект в зоне с недостаточным освещением. По результатам экспериментов было установлено, что фильтр справляется с поставленной задачей предсказания расположения объекта в зоне с плохим освещением. Помимо предсказания расположения объекта в зоне с недостаточной освещенностью, фильтр Калмана уменьшает шум от определения координат объекта. Также явным преимуществом использования фильтра Калмана является его возможность давать прогнозы на основе всего отслеживания, а не только на основании последнего полученного кадра.

В качестве дальнейшего улучшения алгоритма стоит использовать более совершенную систему распознавания, поскольку системе, используемой в ходе эксперимента, требовалось наличие объекта достаточно контрастного с фоном. Также стоит использовать алгоритм для отслеживания объектов меньшего размера, чтобы зона его определения в кадре не изменялась слишком сильно. Возможно улучшить алгоритм обработки изображения для приведения освещения в кадре к одному уровню.

Список источников

1. *Лемешко О. В.* Фильтр Калмана. Теоретические основы и практическое применение // Вестн. магистратуры. 2014. Т. I, № 6 (33). С. 5–8.

2. Kalman Filter from the Ground Up by Alex Becker. 2023.

3. *Faragher R.* Understanding the Basis of the Kalman Filter Via a Simple and Intuitive Derivation // IEEE signal processing magazine. 2012. P. 128–132.

4. *Синицын И. Н.* Фильтры Калмана и Пугачева. М., 2006

5. Справочник по MatLab // MathWorks. URL: https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html?s_tid=hc_panel (дата обращения: 01.12.2023).

6. Tracking occluded objects using Kalman filter and color information / M. M. Khan [et al.] // International journal of computer theory and engineering. 2014. №6(5). P. 438–442.

7. *Patel H. A., Thakore D. G.* Moving object tracking using Kalman filter // International journal of computer science and mobile computing. 2013. Vol. 2, is. 4. P. 326–332.

8. *Васильев К. К., Павлыгин Э. Д., Гуторов А. С.* Построение траекторий маневрирующих целей на основе сплайнов и фильтра Калмана // Автоматизация процессов управления. 2016. № 1 (43). С. 68–75.

9. *Агафонов В. Ю., Розалиев В. Л., Заболеева-Зотова А. В.* Использование фильтра Калмана в задачах трекинга объектов // Интеллектуальные системы: теория и приложения. 2016. Т. 20, № 4. С. 13–17.

10. *Kaspers A.* Blob detection // Image science institute. UMC Utrecht, Tech. Rep., 2011.

УДК 004.032.26 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-114-119**

Е. М. Бадика*
студент
С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
Д. А. Зырянов*
студент
А. П. Бобрышов*
аспирант, ассистент
А. В. Тимощук*
студент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СОЗДАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ЯЧЕЙКИ СОРТИРОВКИ МУСОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ КАМЕР И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Рассматривается возможность автоматизации процесса мусоропереработки, а именно – сортировки мусора. Предлагается использование робототехнического комплекса, включающего в себя промышленного робота или дельта-робота, управляемого с помощью сигнала, сформированного на основе данных классификации объектов. Приводится способ повышения точности системы с помощью гиперспектральной камеры для определения материала объекта и трехканальной (классической) камеры для определения пригодности объекта к переработке. Предложен алгоритм работы системы, а также рассмотрены проблемы, возникающие в процессе проектирования системы, с возможными путями решения. По итогу работы определены цели по качеству системы на начальной стадии внедрения, поставлены цели по итоговому результату от внедрения системы.
Ключевые слова: *автоматизированная сортировка, компьютерное зрение, нейронные сети, гиперспектральное изображение, искусственный интеллект, сортировка мусора, роботизация.*

E. M. Badika*
Student
S. V. Solyonyj*
PhD, Tech., Associate Professor
D. A. Zyryanov*
Student
A. P. Bobryshov*
PhD Student, Assistant
A. V. Tymoshchuk*
Student
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

CREATION OF A ROBOTIC GARBAGE SORTING CELL USING HYPERSPECTRAL CAMERAS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

This article discusses the possibility of automating the waste recycling process, namely garbage sorting. It is proposed to use a robotic complex that includes an industrial robot or a delta robot controlled by a signal generated based on object classification data. A method is given to increase the accuracy of the system using a hyperspectral camera to determine the material of an object and a three-channel (classical) camera to determine the suitability of an object for processing. The algorithm of the system operation is proposed, as well as the problems arising in the process of system design, with possible solutions, are considered. As a result of the work, the goals for the quality of the system at the initial stage (implementation stage) were determined, goals were set for the final result from the implementation of the system.
Keywords: *automated sorting, computer vision, neural networks, hyperspectral imaging, artificial intelligence, garbage sorting, robotics.*

Введение

На сегодняшний день во всем мире стоит острая проблема экологии и охраны окружающей среды. Одним из главных аспектов данного направления является переработка мусора, продвигающаяся в большинстве стран мира, что способствует активному росту появления предприятий по мусороперерабатывающей. В связи со стремительным развитием технологий робототехники и искусственного интеллекта появляется возможность автоматизации все более сложных технологических процессов, не поддающихся конкретным описанным алгоритмам, одной из таких задач и является сортировка мусора.

В данной статье рассматривается предложенное нами решение по интеграции технологий искусственного интеллекта и робототехники в мусороперерабатывающее предприятие с целью автоматизации процесса сортировки мусора.

При решении подобного рода задач сразу подразумевается использование двух важных компонентов такой системы: видеокамера для обнаружения объектов сортировки и их классификации и робот для перемещения объектов. Данное решение обладает проблемой высокой систематической ошибки нейронной сети, что непосредственно отражается на качестве сортировки объектов, а следовательно, влияет на выгоду автоматизации сортировки мусора, снижая эффективность системы с каждым неверно классифицированным объектом.

Анализ современных решений

На сегодняшний день самым распространенным методом сортировки мусора является ручной. При таком подходе вдоль конвейерной линии устанавливаются рабочие места, на которых находятся люди, занимающиеся на каждом участке отбором мусора определенного типа, согласно заданию участка. Данный способ для качественной сортировки требует большого количества пространства, а также финансовых расходов на рабочую силу в качестве людей, что не всегда оправдано.

Также одним из популярных способов отсеивания материалов является применение различного типа сепараторов, например, оптических, вихревых, баллистических или воздушных. Способ предполагает, что каждый объект сортировки расположен на конвейерной ленте друг за другом и классов сортировки применяют, как правило, два. Для улучшения такой системы и увеличения количества сортируемых классов применяют несколько типов сепараторов, расположенных друг за другом, что значительно увеличивает финансовые затраты и необходимому пространству.

Передовым типом сортировки является применение роботизированных сортировочных комплексов. На сегодняшний день активным внедрением таких систем занимается только одна компания – *ZenRobotics*, специализирующаяся на сортировке промышленных отходов, таких как дерево, металл, строительные материалы. Остальные разработки на данный момент являются экспериментальными и не имеют широкого использования. В состав таких систем, помимо роботов, также входят камеры видимого спектра, позволяющие с применением методов машинного обучения классифицировать объекты.

Использование технологий гиперспектральной съемки

При условии того, что роботизированные комплексы применяются успешно при сортировки промышленного мусора, данные системы нельзя применять к каждому типу материалов. Ввиду того, что промышленный мусор имеет малые различия в одном классе, модель технического зрения обучается в такой системе быстро и имеет высокую точность, но при ее применении к большей разнообразности объектов, как, например, сортировка пластика, бумаги и стекла, где один и тот же класс может иметь тысячи разнообразных объектов, точность модели будет падать, а следовательно, эффективность системы снизится.

Для снижения ошибки нейронной сети необходимо внести корректировки в систему, позволяющие алгоритмически выявить тип объекта. В качестве одного из таких решений может быть использование гиперспектральных данных об объекте.

Гиперспектральная съемка – раздел прикладной оптики, изучающий растровые изображения, каждый пиксел которых связан не с отдельным значением интенсивности света, а с полным спектральным разложением оптической энергии в границах какого-либо частотного диапазона. Эти значения обычно не ограничиваются видимым светом и нередко включают в себя также другие длины волн [1]. На рис. 1 приведен пример структуры данных гиперспектрального изображения, представляющего собой «гиперкуб», где каждому каналу соответствует информация по отраженным лучам спектра.

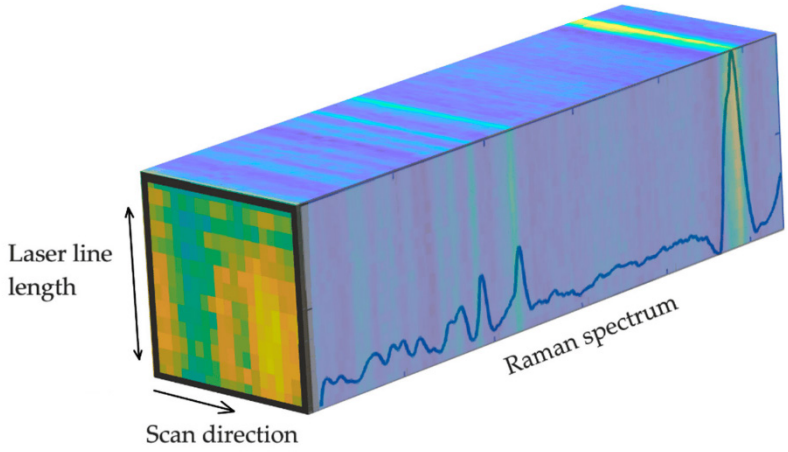


Рис. 1. Пример гиперспектрального изображения

Как известно, объекты разных материалов по-разному ведут себя с излучениями разного спектра, они способны их пропускать через себя, поглощать или отражать.

Мусоропереработке подлежат не все типы материалов, а следовательно, это еще один плюс в пользу использования гиперспектральной камеры.

Дальнейшее повествование будет проводиться на следующем примере: имеется сортировочная линия мусороперерабатывающего производства, выполняющая сортировку мусора на три типа – бумага, стекло и пластик. Задача состоит во внедрении на данную линию роботизированной системы сортировки мусора.

Для понимания точности определения с помощью гиперспектральной камеры материала обратимся к данным по спектрам излучения сортируемых типов изделий:

1) бумага: способна отражать от себя волны видимого спектра и ультрафиолет (190–900 нм) [2];

2) стекло: данные объекты отражают инфракрасное излучение длиной волны более 780 нм и ультрафиолет 230–320 нм. Помимо этого, объекты из стекла способны отражать от себя волны видимого спектра в зависимости от своего цвета [3];

3) пластик: отражает ультрафиолет 100–290 нм, но пропускает через себя волны с длиной волны более 375 нм. В зависимости от цвета, пластик также может отражать от себя волны видимого спектра [4].

На основе проанализированных данных по излучаемому спектру каждого из материалов можно выделить следующие особенности:

1) пластик отражает волны ультрафиолетового спектра;

2) стекло отражает волны, принадлежащие инфракрасному спектру;

3) бумага отражает волны видимого света.

Полученные теоретически данные позволяют произвести первичную настройку гиперспектральной камеры. Так как получаемые данные являются анализом отражения по каждой из излучаемых камерой длин волн, имеется возможность реализации среза данных по каналам (аналогично наложению цветовой маски при анализе трехканального изображения). Благодаря теоретическим знаниям спектральных свойств материалов возможно подобрать параметры этих масок. Дальнейшее уточнение по отражению спектра каждого материала (т. е. границы среза данных для поиска материала) необходимо определить экспериментально, что поспособствует повышению точности классификации материалов, однако, в силу того, что спектры излучения между классами слабо пересекаются, изначальная точность распознавания будет высокой благодаря применения алгоритмического решения, а не вероятностного подхода, основанного на нейронных сетях, в любом случае дающих определенную ошибку

Взаимодействие с нейронной сетью

Несмотря на то, что материал успешно определяется гиперспектральной камерой, не все изделия подлежат переработке. Например, пластиковые трубочки, одноразовая посуда, мультифора для документов не подлежат переработке. Для решения данной проблемы необходимо использование классической трехканальной камеры в системе автоматизированной сортировки. Очевидно, что классификация пригодно-

сти объектов к сортировке будет производиться на основе нейронных сетей, что, несомненно, будет вносить свою ошибку. Однако стоит заметить, что данная модель будет иметь более высокую точность, поскольку задача для нейросети сузилась с определения класса для сортировки до пригодности к сортировке объекта определенного класса. Для еще большей точности возможно обучить три модели, каждая из которых будет определять пригодность к сортировке объекта по уже конкретному классу.

Ввиду возможных неточностей обработки гиперспектрального изображения, использование анализа с помощью трехканальной камеры и нейросети позволит создать условия выбора, подобные метрики F1 score, учитывающей не только вероятность достоверного или ложного результата, но и фальсификацию достоверного или ложного результата. Использование такой системы оценки решений позволит точнее задать доверительный интервал, являющийся пороговым значением предсказания модели, при котором результат считается положительным, что также позволяет, снизить статическую ошибку модели.

Состав системы роботизированной сортировки и алгоритм работы

На основе проанализированных выше данных можно выделить основной состав системы автоматизированной сортировки мусора и назначение каждого из компонентов:

1) гиперспектральная камера: определение материала объекта;

2) трехканальная камера: определение пригодности объекта к сортировке;

3) робот: сортировка деталей. Может использоваться промышленный или дельта-робот в зависимости от возможностей по установке;

4) конвейерная лента: доставка мусора на участок сортировки.

На основе полученных сведений возможно разработать первичный алгоритм системы, на который следует опираться при проектировании подобного рода робототехнических комплексов [5].

Объекты сортировки перемещаются на конвейерной линии и попадают в зону действия гиперспектральной камеры. Полученные данные попадают в программное обеспечение, где происходит срез данных гиперкуба, инфракрасный спектр, ультрафиолетовый спектр, видимый спектр, для определения типа материала. Далее объект исследуется с помощью трехканальной камеры и нейронной сети на пригодность к сортировке. При положительном результате подается сигнал на робота с классом объекта и его координатами для перемещения роботом. Важно при подаче координат учитывать скорость перемещения конвейерной ленты и время обработки изображений с гиперспектральной и трехканальной камер. На рис. 2 показано взаимодействие компонентов между собой в виде диаграммы потока данных, на рис. 3 – последовательный алгоритм работы всей системы.

Возможные проблемы и пути их решения

При проектировании системы возможны следующие проблемы.

1. Определение местоположения объекта на конвейере. Для решения данной задачи необходимо скорректировать время алгоритма определения координат мусора таким образом, чтобы положение объекта на камере переводилось в координаты базы робота, которая настроена по конвейеру. В процессе настройки необходимо учесть, что координаты для робота должны

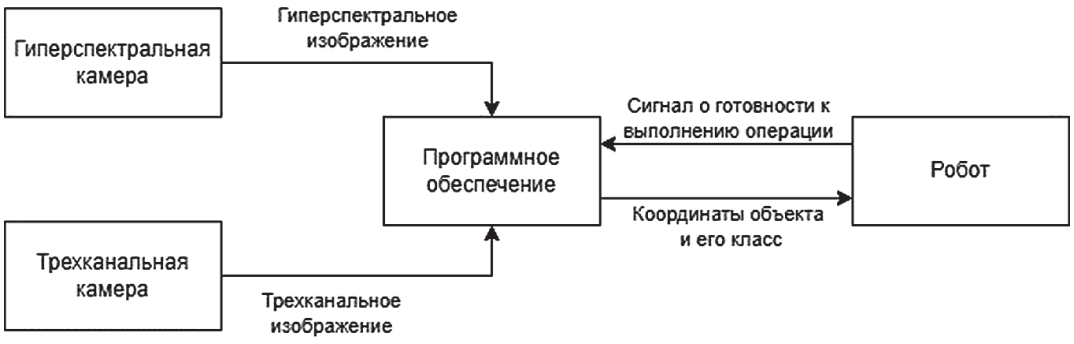


Рис. 2. Диаграмма потока данных системы

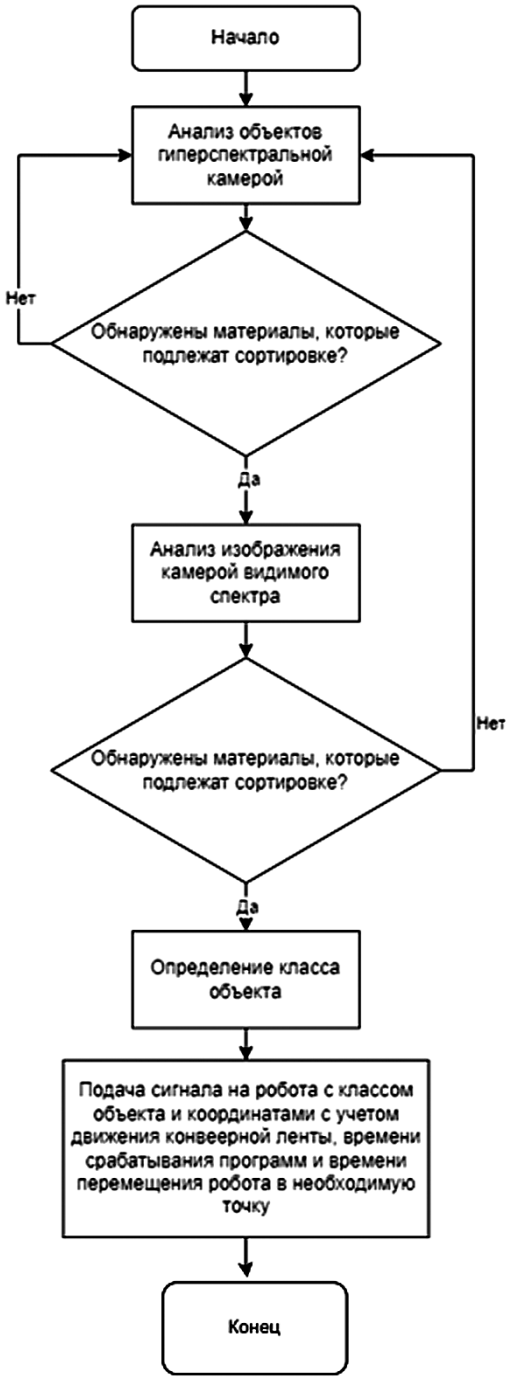


Рис. 3. Алгоритм работы РТК

передаваться с учетом движения конвейерной линии, времени обработки изображения с гиперспектральной камеры и с камеры видимого спектра, также временем движения робота до необходимой координаты (для упрощения можно взять за постоянное).

2. Идентификация сильнозагрязненных объектов. Так как сильнозагрязненные объекты будут неверно классифицированы гиперспектральной камерой, необходимо также добавить возможность определение материала трехканальной камерой.

Пуско-наладочные работы

На начальной стадии внедрения технологии в использование, по причине использования алгоритмов искусственного интеллекта, будет присутствовать большая ошибка, снижающая качество сортировки по сравнении с ручной. Поэтому в процессе работы необходимо будет осуществлять постоянное дообучение моделей с целью повышения точности классификации объектов сортировки.

При внедрении технологии необходим оператор, который будет оценивать правильность решений искусственного интеллекта и в случае чего отменять сигнал на робота. Также после линии сортировки роботом имеет смысл поставить одного-двух человек для окончательной сортировки мусора.

Конечный результат

Конечный ожидаемый результат от системы представляется полностью автоматизированной сортировочной линией, способной с высокой вероятностью определять тип материала и пригодность объекта для сортировки.

Для корректной работы линии не нужен оператор, контролирующий правильность решений, и нет необходимости людях после роботизированной линии для окончательной сортировки. Предполагается, что после робота останется только не подлежащий переработке мусор.

Выводы

1. В работе исследованы существующие способы сортировки мусора для последующей переработки. Произведен поиск систем, автоматизирующих данный процесс, определены недостатки имеющихся решений. На основе полученных результатов анализа была предложена модернизация.

2. Предлагаемая система сортировки мусора позволяет снизить ошибку при классификации объектов благодаря использованию камеры гиперспектра. Аналитическим путем было выявлено, что с использованием такого подхода возможно однозначное определение материала,

что значительно повышает точность сортировки. Применение алгоритмов машинного обучения снижает ошибку распознавания загрязненных объектов и позволяет выявить пригодность объекта к переработке.

3. Решение имеет большие возможности по внедрению ввиду малого занимаемого пространства и высокой точности по сравнению с аналогичными решениями, а также, при необходимости, система может быть перестроена на большее количество классов.

Список источников

1. *Колесник И. В.* Земля. Взгляд из космоса. Гиперспектральная съемка // Шаг в науку. 2019. № 3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/zemlya-vzglyad-iz-kosmosa-giperspektralnaya-semka (дата обращения: 04.12.2023).

2. *Варепо Л. Г.* Исследование свойств бумаг методом ИК-спектроскопии // Фундамент. исслед. 2007. № 12-3. С. 463–464.

3. Спектральные характеристики пропускания светофильтров из цветного стекла. / ООО «Электростекло». URL: https://www.elektrosteklo.ru/Elektrosteklo_Color_Glass_Spectral_Transmittance.pdf (дата обращения: 28.11.2023).

4. *Гаранина Д. Е.* Оптические свойства полимеров // Студенческий научный форум: Материалы XII Междунар. студ. науч. конф. URL: https://scienceforum.ru/2020/article/2018019936 (дата обращения: 28.11.2023).

5. *Бадика Е. М., Соленый С. В.* Организация системы управления робототехническим комплексом сортировки отходов на основе данных машинного зрения // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. Пос. Дивноморское: Артишок, 2023. С. 43–44.

УДК 621.313.13-181.48 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-120-124**

В. И. Бойков*
кандидат технических наук, доцент
С. В. Быстров**
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
*** Национальный исследовательский университет ИТМО*

ЭВОЛЮЦИЯ СИЛОВЫХ ПЬЕЗОАКТЮАТОРОВ С ОГРАНИЧЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Рассмотрены эволюция конструктивных особенностей силовых пьезодвигателей с ограниченным диапазоном перемещений и их влияние на основные характеристики. Сделана оценка возможностей пьезоактюаторов для применения их в прецизионных системах позиционирования различного назначения.
Ключевые слова: *пьезоактюатор, мультипликатор, биморфная конструкция, пьезоэлектрическая платформа.*

V. I. Boikov*
PhD, Tech., Associate Professor
S. V. Bystrov**
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
*** ITMO University*

EVOLUTION OF POWER PIEZOACTUATORS WITH A LIMITED RANGE OF MOVEMENTS

The evolution of the design features of power piezo motors with a limited range of displacements and their influence on the main characteristics are considered. An assessment of the capabilities of piezoactuators for their use in precision positioning systems for various purposes is made.
Keywords: *piezoactuator, multiplier, bimorph construction, piezoelectric platform.*

Пьезоэлектрические устройства теперь можно встретить повсюду – от бытовой техники до оптико-электронных систем специального назначения. Заметно вырос к ним интерес в авиационной и космической технике [1–3]: они применяются в системах гашения вибраций корпусов летательных аппаратов, в системах управления закрылками самолетов и профилем лопастей вертолетов, в системах навигации и наведения.

Пьезоэлектрические преобразователи информации могут быть использованы как датчики усилий и ускорений и как исполнительные устройства для создания линейных и угловых перемещений различных объектов. Работают такие преобразователи на прямом и (или) обратном пьезоэффектах. В данной работе мы не акцентируем внимание на физических принципах работы пьезоэлектрических исполнительных устройств, а пытаемся разобраться в эволюции конструктивных решений силовых пьезодвигателей с ограниченным диапазоном перемещений и оценить их возможности при использовании в системах точного позиционирования различных объектов. В сети можно найти много информации по пьезоэлектрическим устройствам, но она носит большей частью разрозненный характер с различной терминологией и представляет собой переводы каталогов российских и зарубежных производителей.

В статье на примере изделий АО «НИИ „Элпа“», которые не уступают лучшим образцам зарубежных производителей, анализируется развитие конструктивных решений пьезоактюаторов, дается сравнение их характеристик и возможностей применительно к прецизионным системам линейного и углового позиционирования.

Силовые пьезодвигатели уже давно и очень активно используются в оптическом приборостроении, автомобилестроении в качестве исполнительных устройств в различных преци-

зионных системах позиционирования объектов. Основным активным элементом прецизионных двигателей является пьезоактюатор, который представляет собой многослойную конструкцию из пьезокерамических элементов, жестко механически связанных между собой. Пьезоэлементы могут быть различной формы (диски, цилиндры, кольца, пластины и др.), и это позволяет разрабатывать конструктивные решения двигателей под любые технические задачи, связанные с микроперемещениями. Материал, из которого изготавливают пьезоэлементы, – пьезоэлектрическая керамика, в России – в основном системы ЦТС (цирконат-титанат свинца) различных модификаций. За рубежом ее аналогом является керамика PZT. Основными производителями являются АО «НИИ „Элпа"» (г. Зеленоград) и ООО «Аврора ЭЛМА» (г. Волгоград) и др. Из всего многообразия производимой продукции можно выделить для целей позиционирования три базовых типа конструкций пьезоактюаторов:

– составные пакетные;
– многослойные тонкопленочные;
– биморфные.

Исторически сложилось так, что развитие прецизионных исполнительных устройств начиналось с составных пакетных (рис. 1, *а*) и биморфных (рис. 1, *в*) конструкций, которые вполне удовлетворяли требованиям задач оптических систем (активной и адаптивной оптики, систем фокусировки и юстировки, управления оптическим излучением и т. д.), обеспечивая перемещение оптических элементов в диапазоне от 0,1 до 50 мкм с «ручным» управлением. В таких задачах актюаторы могут использоваться самостоятельно, без дополнительных конструктивных элементов и кинематических связей с объектом управления, что обеспечивается большим выбором типа-размеров пьезоэлементов и актюаторов, производимых промышленностью. На примере одного из них покажем основные характеристики (табл. 1), которые необходимо учитывать при выборе типоразмера и формы под конкретную задачу.

Актюаторы пакетного типа, как правило, используются в силовых задачах с перемещением объектов большой массы (десятки килограмм) или для деформации конструкций с высокой жесткостью. Потому при выборе элемента нужно обращать внимание на такие характеристики, как диапазон перемещений, блокирующее усилие, управляющее напряжение и др. Биморфные конструкции рекомендуется применять там, где требуются перемещения (до единиц миллиметров) при небольшой массе и малых динамических нагрузках, а также где необходимы угловые перемещения. Если в пакетных конструкциях количество элементов может достигать несколько десятков, то биморфные актюаторы состоят из двух жестко связанных между собой пластин, и желаемое перемещение достигается при их изгибе, который возникает из-за разнонаправленных деформаций пластин. Основные характеристики биморфных конструкций актюаторов приведены в табл. 2.

В настоящее время, судя по публикациям в специальной литературе, наиболее востребованными стали многослойные тонкопленочные актюаторы (рис. 1, *б*). Их массовый выпуск ос-

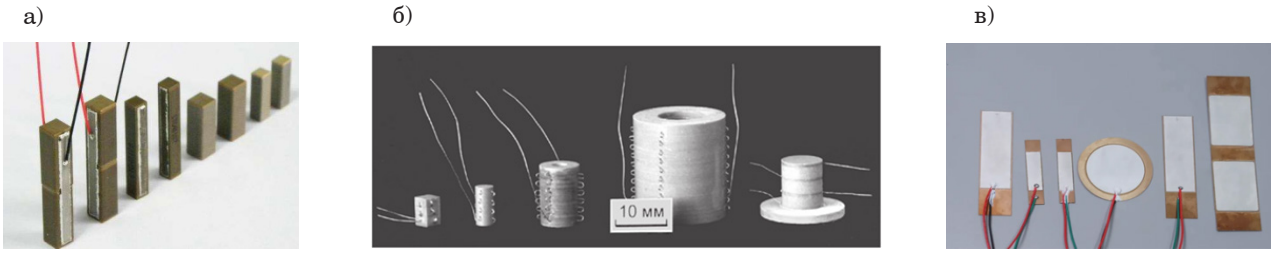


Рис. 1. Пьезоэлектрические актюаторы: а – пакетного типа; б – многослойные; в – биморфные

Таблица 1

Характеристики пьезоактюаторов пакетного типа (П1, П3)

Тип форма элементов	Количество элементов, шт.	Габариты, диаметр, мм	Масса, г	Статическая емкость, нФ	Максимальное управляющее напряжение, В	Максимальное перемещение, мкм	Блокирующее усилие, Н
П1-диски	5	15	10	68	600	3	1500
П3-кольца	7	30	6	37	600	4,5	1500

Таблица 2

Характеристики биморфов с параллельным* соединением

Количество элементов, шт.	Габариты, рабочая длина, мм	Масса, г	Статическая емкость, нФ	Максимальное управляющее напряжение, В	Максимальное перемещение, свободный прогиб, мкм	Блокирующее усилие, Н
2	35	4	13	180	(±290)	0,45
2	28,5	2	4	180	(±143)	0,12

* – при последовательном соединении пластин статическая емкость уменьшается в 4 раза, а для получения параметров, указанных в табл. 3, следует увеличить рабочее электрическое напряжение в 2 раза.

Таблица 3

Характеристики многослойных пьезоактюаторов (материал – ЦТС-46)*

Количество слоев, шт.	Габариты, мм	Масса, г	Статическая емкость, нФ	Максимальное управляющее напряжение, В	Максимальное перемещение, мкм	Блокирующее усилие, Н
350	7,5×7,5×19	6	3250	100	15	1350
1250	7,5×7,5×70	25	11600	100	50	1350

*– здесь и в табл. 4 представлены характеристики изделий фирмы АО «НИИ „Элпа“».

воен и у нас в стране, и за рубежом с применением новых технологий изготовления тонкой пьезоэлектрической пленки (толщина составляет 60–80 нм).

Конструкция в этом случае состоит не из отдельных элементов, а из ленты с электродами, сложенной по специальной технологии и спрессованной под давлением до монолитного состояния. Характеристики многослойных актюаторов приведены в табл. 3.

Нужно отметить, что в данном случае в разы увеличивается диапазон перемещений при меньших габаритах и, что очень важно, при меньшем управляющем электрическом напряжении. В результате снижаются масса и габариты конечных изделий, упрощается электронная схема системы управления. Этим объясняется высокая востребованность актюаторов данного типа.

К числу недостатков подобных конструкций, ограничивающих их использование, следует отнести относительно высокое значение электрической емкости из-за малой толщины пленки и большого количества слоев в актюаторе, что может, в конечном итоге, приводить к снижению полосы пропускания, т. е. быстродействия приводов и систем на их основе.

Следующим шагом на пути расширения возможностей и улучшения характеристик актюаторов явилось использование дополнительных конструктивных элементов, обеспечивающих предварительное сжатие пакетных и многослойных конструкций и повышение жесткости биморфных элементов (рис. 2). В пакетных конструкциях с отверстием по центру (при использовании кольцевых или цилиндрических элементов) на этапе их изготовления применяют специальные стяжки (например, из бериллиевой бронзы), во всех остальных случаях используют либо упругие гофрированные корпуса, либо специальные внешние упругие элементы. Предварительное сжатие (нагружение) при-

Рис. 2. Предварительно нагруженные конструкции актюаторов: а – пакетного типа в гофрированном корпусе и с механической внутренней стяжкой; б – многослойные актюаторы с внешней пружиной; в – биморфные конструкции с металлической пластиной

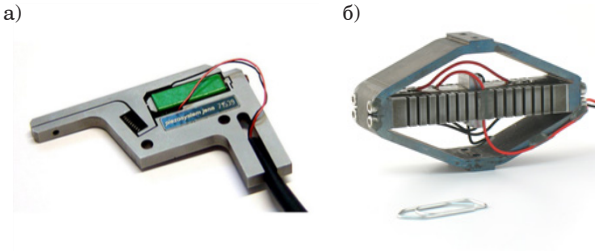


Рис. 3. Многослойные актюаторы с мультипликаторами: а – рычажного типа; б – эллиптической формы

водит к снижению потерь, улучшению статических и динамических характеристик, повышению надежности. Биморфные элементы дополняются металлическими пластинами или компонуются из нескольких пар биморфов, что придает дополнительную жесткость конструкции, снижает вероятность ее разрушения при динамических нагрузках, но уменьшает диапазон перемещения.

Расширение областей применения пьезоактюаторов и двигателей на их основе приводит и к изменению требований к их характеристикам. Так, во многих технических приложениях требуется перемещение на 100 и более микрон при тех же точностных и динамических характеристиках и минимальном росте массогабаритных показателей. Составные пакетные конструкции уже не могут удовлетворить таким требованиям. А вот сочетание многослойных актюаторов с механическим мультипликаторами перемещений позволяет успешно справляться с такими задачами. Мультипликатор – это конструктивный элемент типа повышающего редуктора, позволяет в разы увеличивать диапазон перемещений. Как правило, реализуется два принципа построения кинематических схем мультипликаторов:

– рычажный (рис. 3, *а*) (с использованием соотношений плеч рычагов);

– эллиптический (рис. 3, *б*) (активный пьезоактюатор устанавливается в оболочку эллиптической формы).

Применение рычажных конструкций ограничено небольшим увеличением диапазона перемещения (в 2–2,5 раза) и существенным снижением блокирующих усилий (на порядок).

Эллиптические мультипликаторы применяются гораздо чаще в силу компактности конструкций, большим увеличением диапазона перемещений (5–6 раз) и увеличения блокирующих усилий. В эллиптической конструкции пьезоактюатор располагается вдоль главной оси эллипса, и деформация при сжатии преобразуется в рабочее перемещение вдоль короткой оси эллипса. Положительным является еще и то, что оболочка выполняет сразу несколько функций: мультипликатора, элемента, обеспечивающего предварительное сжатие актюатора, и соединение с объектом управления.

Полученные конструктивные преимущества используются при реализации задач многокоординатного пространственного управления объектами в так называемых пьезоэлектрических платформах (подвижках) [4]. Их разработкой, производством и внедрением у нас в стране занимаются АО «НИИ „Элпа“» и ООО «Промышленная метрология», за рубежом – такие фирмы, как *Physik Instrument*, *Newport*, *Piezosystem Jena*, *Cedrat Technologies*. Основным назначение платформ является управление пространственным положением зеркал оптико-электронных систем. Существует два типа платформ:

1) линейного перемещения (по трем координатам *X*, *Y*, *Z*);

2) наклонные для малых угловых перемещений.

В НИИ «Элпа» разработана и производится платформа рычажного типа ПНП-10 (рис. 4, *а*), в которой применены многослойные актюаторы серии «АПН» с предварительным сжатием.

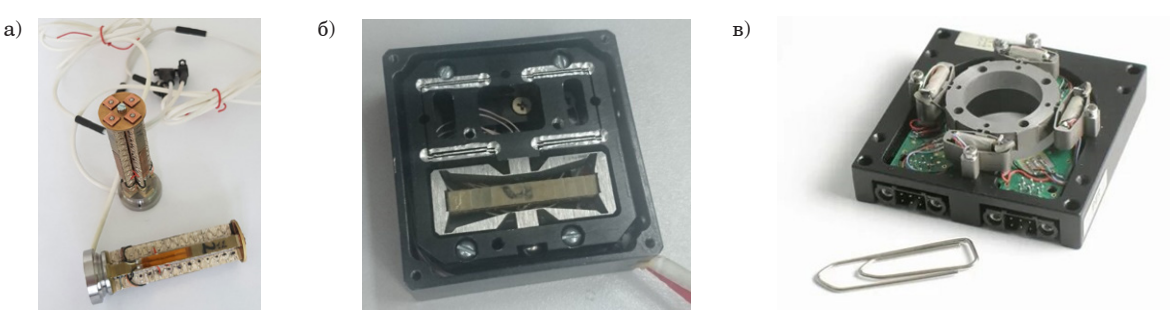


Рис. 4. Пьезоплатформы с угловыми и линейными перемещениями: а – наклонная платформа ПНП-10; б – линейная платформа Cedrat Technologies; в – линейная платформа ППЛП-100

Таблица 4

Основные характеристики наклонной платформы ПНП-10

Габариты, диаметр, высота, мм	Статическая емкость по осям, мкФ	Максимальное управляющее напряжение, В	Смещение по осям при максимальном U, мкм	Диапазон углов поворота, угл. мин
∅28×91	10	120	45	20

Платформа служит для создания угловых перемещений объектов по двум координатам, ее характеристики сведены в табл. 4.

В платформах с линейными перемещениями, как правило, используются конструкции с эллиптическими мультипликаторами, обеспечивающие большие диапазоны (рис. 4, *б*). Форма оболочки постоянно оптимизируется с целью достижения самых высоких статических и динамических характеристик (рис. 4, *в*).

Заключение

Анализ конструктивных решений силовых пьезодвигателей с ограниченным диапазоном перемещений показал, что применение многослойной пьезокерамики имеет большие преимущества по сравнению с пакетными и биморфными типами двигателей в задачах с перемещениями до 100 мкм и развиваемыми усилиями до 1500 Н с ограничением полосы пропускания до 100 Гц в системах, где они используются. Существенного увеличения диапазона перемещений можно добиться, используя мультипликаторы рычажного или эллипсовидного типов. Представляется, что самым оптимальным решением является использование эллипсовидных мультипликаторов, которые могут выполнять сразу несколько функций – увеличение диапазона перемещений, предварительное сжатие пьезоактюатора, связь с объектом и т. д. при несущественном увеличении габаритов устройства в целом. Расширения полосы пропускания систем можно добиться применением актюаторов с меньшим значением собственной электрической емкости. В диапазонах перемещений до 100 мкм при том же уровне развиваемых усилий это могут быть и пакетные актюаторы. Для задач с большими перемещениями (более 100 мкм) малыми нагрузками (менее 10 г) и высоким быстродействием (полоса пропускания системы более 100 Гц) имеет смысл использовать актюаторы биморфного типа.

Список источников

1. *Быстров С. В., Бойков В. И., Карев П. В.* Применение пьезодвигателей в низкоорбитальных космических аппаратах // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2018. № 3. С. 130–136.

2. *Карев П. В.* Обзор систем микросканирования и оптической стабилизации в инфракрасных камерах // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2017. № 2. С. 96–102.

3. *Карев П. В.* Миниатюрные пьезоэлектрические механизмы для электрооптических и космических применений // Контенант. 2016. Т. 15, № 1. С. 67–72.

4. Состояние и перспективы развития отечественных пьезоэлектрических платформ нанопозиционирования / Л. Р. Брушкин [и др.] // Компоненты и технологии. 2020. № 5. С. 60–65.

УДК 621.3.08 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-125-138**

В. И. Бойков*
кандидат технических наук, доцент
С. В. Быстров**
кандидат технических наук, доцент
А. Б. Бушуев**
кандидат технических наук, старший преподаватель
Ю. В. Литвинов*
кандидат технических наук, доцент
О. С. Нуйя*
кандидат технических наук, доцент
М. В. Сержантова*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
*** Национальный исследовательский университет ИТМО*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ MATLAB/SIMULINK В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С УЧЕБНЫМИ СТЕНДАМИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Рассмотрены особенности использования инструментов MatLab/Simulink при проведении экспериментов с физическими объектами в режиме реального времени на примере стенда для исследования цифровых систем управления маломощным асинхронным электродвигателем. Показано, что доступные современные электронные модули позволяют достаточно просто создавать лабораторные установки и проводить эксперименты с измерениями, цифровой обработкой информации и управлением реальными техническими устройствами. Рассматриваемый подход имеет целью повышение уровня инженерной подготовки студентов.
Ключевые слова: *цифровой электропривод, MatLab/Simulink, режим реального времени.*

V. I. Boikov *
PhD, Tech., Associate Professor
S. V. Bystrov**
PhD, Tech., Associate Professor
A. B. Bushuev**
PhD, Tech., Senior Lecturer
Ju. V. Litvinov*
PhD, Tech., Associate Professor
O. S. Nuyya*
PhD, Tech., Associate Professor
M. V. Sergeantova*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***ITMO University*

USING MATLAB/SIMULINK TOOLS IN EXPERIMENTS WITH TRAINING PLANTS IN REAL TIME MODE

The features of using MatLab/Simulink tools are considered when conducting experiments with physical objects in real time on the example of the plant for study of digital control systems of a low-power asynchronous electric motor. It is shown that the available modern electronic modules make it quite easy to create laboratory installations and conduct experiments with measurements, digital information processing and control of real technical devices. The considered approach is aimed at increasing the level of engineering training of students.
Keywords: *digital electric drive, MatLab/Simulink, real-time mode.*

Введение

В настоящее время средства MatLab/Simulink широко применяются в учебном процессе для проведения экспериментов с использованием виртуальных моделей физических устройств [1–3]. В то же время на рынке имеются недорогие технические средства, позволяющие подключать реальные объекты к компьютеру и выполнять целый ряд экспериментальных исследований. В первую очередь, имеются в виду одноплатные модули микроконтроллеров различных производителей. Наиболее распространены модули фирмы STM Microelectroniks и модули Arduino различных производителей. Указанные модули получили настолько широкое распространение, что были разработаны библиотеки программных модулей, поддерживающие сопряжение указанных микроконтроллеров с компьютером, а также интеграцию их в среду MatLab/Simulink [4–6].

Имеющиеся в настоящее время в свободном доступе программные средства позволяют выполнять автоматическую генерацию исполняемого кода и загружать его во внешний модуль. Этот механизм для микроконтроллеров семейства STM32F4 с использованием библиотеки Waijung Blockset фирмы *Amagin* подробно изложен в работах [7–9]. В данной статье мы уделяем внимание и другой стороне задачи – генерации данных и обработке ответов в среде MatLab/Simulink в режиме реального времени. В качестве примере рассмотрена организация обмена данными компьютера со стендом для исследования цифровых систем управления маломощным асинхронным электродвигателем с полым немагнитным ротором.

Краткое описание стенда

На рис. 1 показан внешний вид стенда для исследования цифровых систем управления маломощным асинхронным электродвигателем. Она содержит электромеханическую часть и средства сопряжения с компьютером. Электромеханическая часть 1 содержит асинхронный двухфазный электродвигатель с полым немагнитным ротором марки ДГ-2ТА со встроенным тахогенератором переменного тока, механический редуктор и потенциометрический дат-

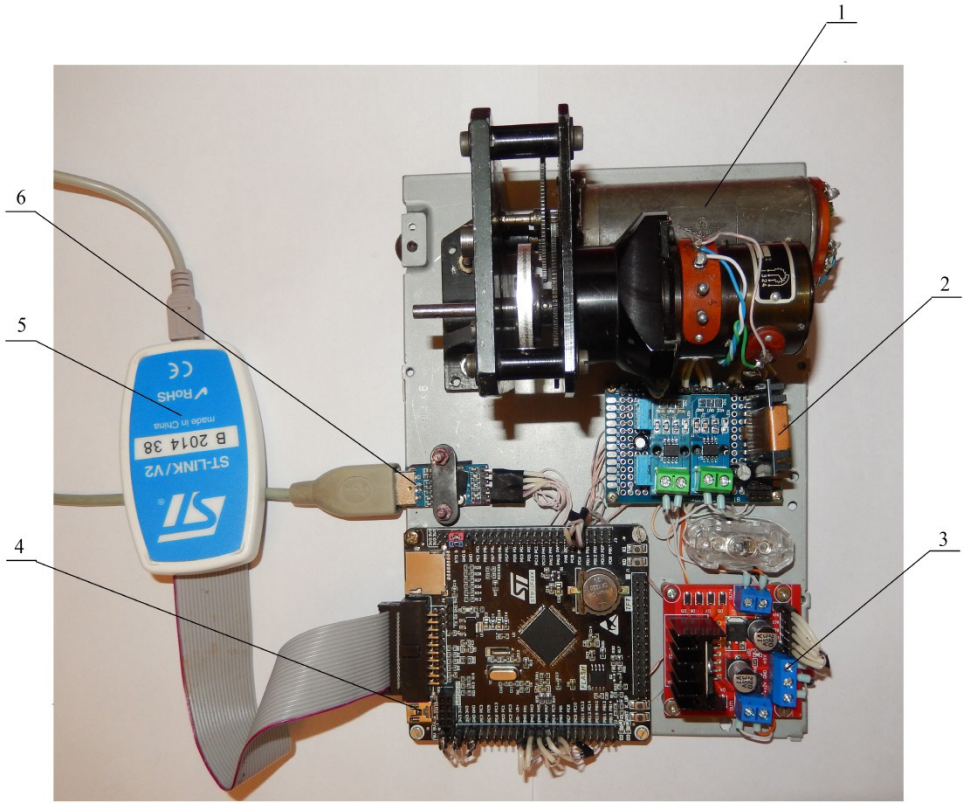


Рис. 1. Стенд для исследования цифровых систем управления маломощным асинхронным электродвигателем: 1 – электромеханическая часть; 2 – драйвер L293; 3 – драйвер L29; 4 – модуль микроконтроллера; 5 – модуль ST-Link; 6 – модуль USB-Serial

чик угла поворота. Рабочее напряжение питания электродвигателя – 36 В, номинальная частота питающего напряжения – 400 Гц. Потенциометрический датчик угла поворота построен на сдвоенном потенциометре ПТП12. Потенциометры развернуты между собой на угол 90°, что позволяет измерять угловое положение выходного вала в пределах полного оборота.

Сопряжение электромеханической части с компьютером выполнено на серийном модуле 4 марки Black STM32F4VE на базе микроконтроллера STM32F407VET6. Указанный микроконтроллер работает на тактовой частоте до 168 МГц и имеет все необходимые средства сопряжения с объектом – многоканальные измерительные аналого-цифровые преобразователи (АЦП), формирователи управления с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) и устройства последовательной цифровой связи с компьютером.

На рис. 2 показана функциональная схема установки. Связь микроконтроллера с компьютером осуществляется посредством модуля ST-Link (для загрузки программного кода в микроконтроллер (*5* на рис. 1) и модуля USB – Serial (*6* на рис. 1). Для обмена данными с компьютером использован виртуальный COM-порт. Оба модуля подключаются к компьютеру через порты USB.

Электродвигатель сопрягается с микроконтроллером посредством полномостовых ключевых драйверов (инвертор с ШИМ-управлением). Относительно низкое напряжение питания и маленькая мощность двигателя позволило применить для сопряжения простые модули драйверов типов L298 (для формирования напряжений управления и возбуждения двигателя, модуль *3* на рис. 1) и L293 (модуль *2* на рис. 1) для формирования напряжения возбуждения тахогенератора.

Драйверы L298 и L293 позволяют изменять сигналы возбуждения U_v и управления U_u двигателя, гибко изменяя способ управления им. Большое количество высокоскоростных каналов АЦП (12 каналов) позволяют измерять многие параметры электропривода. В установке измеряются угловое положение выходного вала, угловая скорость вращения ротора, силы токов в обмотках управления и возбуждения двигателя.

Программное обеспечение в среде MatLab/Simulink

Для автоматической генерации кода работы микроконтроллеров семейства STM32F4 в среде MatLab/Simulink используются специальные программные средства – это или специализированный Embedded Coder, или библиотека Waijung Blockset. Оба программных продукта хорошо себя зарекомендовали. В приводимых ниже примерах использована библиотека Waijung v.18.11. На сайте фирмы-разработчика *Amagin* [11] доступны для свободного скачивания и ранние версии, начиная с версии Waijung 15.04. Напомним, что, начиная с версии MatLab

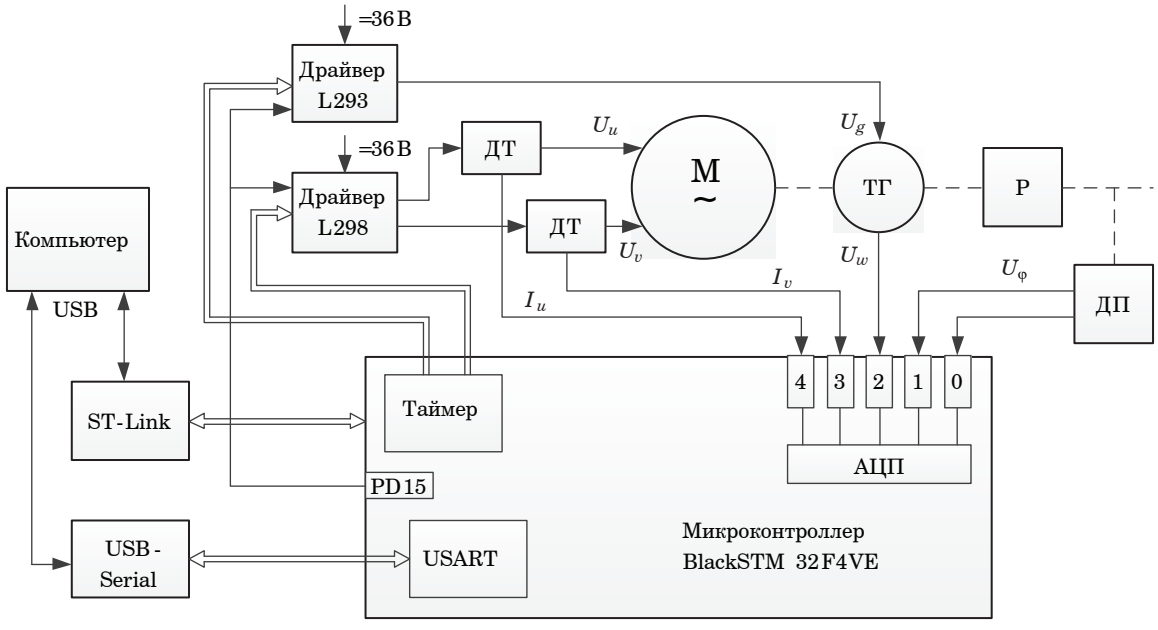


Рис. 2. Функциональная схема лабораторной установки

2018, изменились некоторые алгоритмы работы этого программного продукта. Кроме того, для работы под 64-битовыми операционными системами (ОС)следует устанавливать библиотеку Waijung v.18.11, в которой также учтены изменения в MatLab. Под 32-битовые операционные системы можно устанавливать библиотеки Waijung более ранних версий.

Процедура установки и состав библиотеки Waijung достаточно полно освещена в литературе и Интернете, включая видеоуроки по ее применению [5, 9]. Библиотека включает в себя поддержку всех модулей микроконтроллера STM32F4 в различных его модификациях. Поэтому отметим только используемые модули.

Для управления электродвигателем использованы три канала таймера TIM8 микроконтроллера. Два канала используются для формирования сигналов управления и возбуждения электродвигателя и один канал для формирования сигнала возбуждения тахогенератора.

Для оцифровки сигналов датчиков использованы штатные 12-разрядные АЦП микроконтроллера. Кроме этого, для связи с компьютером использован штатный модуль последовательной связи UART1.

Работа с установкой осуществляется исключительно в среде Simulink, но применяются два различных окна. Первое окно, условно названное Taget, служит для создания модели программы работы микроконтроллера, автоматической генерации исполняемого кода и загрузки его в микроконтроллер. Обмен данными с микроконтроллером выполняется через модуль ST-Link, драйвер которого имеется в свободном доступе и устанавливается отдельно. Второе окно, условно названное Host, служит для управления проведением экспериментов со стендом, задания режимов его работы и обработки получаемых данных. В этом окне можно визуализировать и протоколировать результаты работы. Обмен данными с микроконтроллером выполняется в режиме реального времени через модуль USB – Serial. Драйвер для данного устройства также имеется в свободном доступе и должен быть установлен отдельно.

Окно Target программы работы микроконтроллера

Для управления двухфазным асинхронным двигателем необходимо сформировать два гармонических сигнала со сдвигом фаз $\pi/2$. Частоту сигналов двигателя ДГ-2ТА можно изменять от 0 до 400 Гц, подразумевая возможность изучения классических способов управления двигателем, включая и частотное управление. Следует учитывать, что при работе с физической аппаратурой MatLab работает только с фиксированным шагом квантования времени (режим настройки Fixed-step вкладки Solver).

Нетрудно показать, что генератор двухфазного гармонического сигнала амплитудой 1 [у. е.] и частотой w [1/с] в дискретном времени с периодом квантования T [с] может быть задан следующей системой уравнений:

$$x_1\left((k+1)T\right) = \cos(Tw)x_1\left(kT\right) + \sin(Tw)x_2\left(kT\right);$$

$$x_2\left((k+1)T\right) = \\ = -\sin(Tw)x_1\left(kT\right) + \cos(Tw)x_2\left(kT\right), \quad (1)$$

$$x_1(0) = 0; x_2(0) = 1.$$

Переменная $x_1\left(kT\right)$ – отсчеты сигнала $U_1(t) = \sin(wt)$, а $x_2\left(kT\right)$ – отсчеты сигнала $U_2(t) = \cos(wt)$ в дискретные моменты времени $kT = t$, $k = 0, 1, 2, \ldots$ – номер дискретного отсчета.

На рис. 3 показана структурная схема генератора гармонического сигнала, оформленная в виде блока Atomic Subsystem средствами Simulink. Входные сигналы блока: амплитуда сигнала управления AmpUu (относительные условные единицы из диапазона 0–100 %), амплитуда сигнала возбуждения AmpUv, частота гармонического сигнала W (рад/с). Внутренний параметр блока – постоянный период квантования времени T (с).

Так как максимальная частота сигналов двигателя составляет 400 Гц, период квантования времени T был выбран равным 0,0001 с. С таким же периодом работает модуль ШИМ микроконтроллера. Указанный период квантования времени должен быть установлен в настройках вкладки Simulation модели и в настройках модуля Waijung Compiler GNU ARM.

На рис. 3 на блоках задержки x1 и x2 реализуются уравнения (1), формируя гармонические сигналы заданной частоты и амплитудой 1. Нужная амплитуда сигналов из диапазона 0–100 % получается в блоках умножения Product5 и Product6. На элементах задержки x3 и x4 реализован дополнительный генератор гармонического сигнала фиксированной амплитуды с частотой 400 Гц. Этот генератор используется для формирования сигнала возбуждения тахогенератора.

На рис. 4 приведен пример модели формирования сигналов управления и контроля электродвигателя. Гармонические сигналы управления и возбуждения подаются на

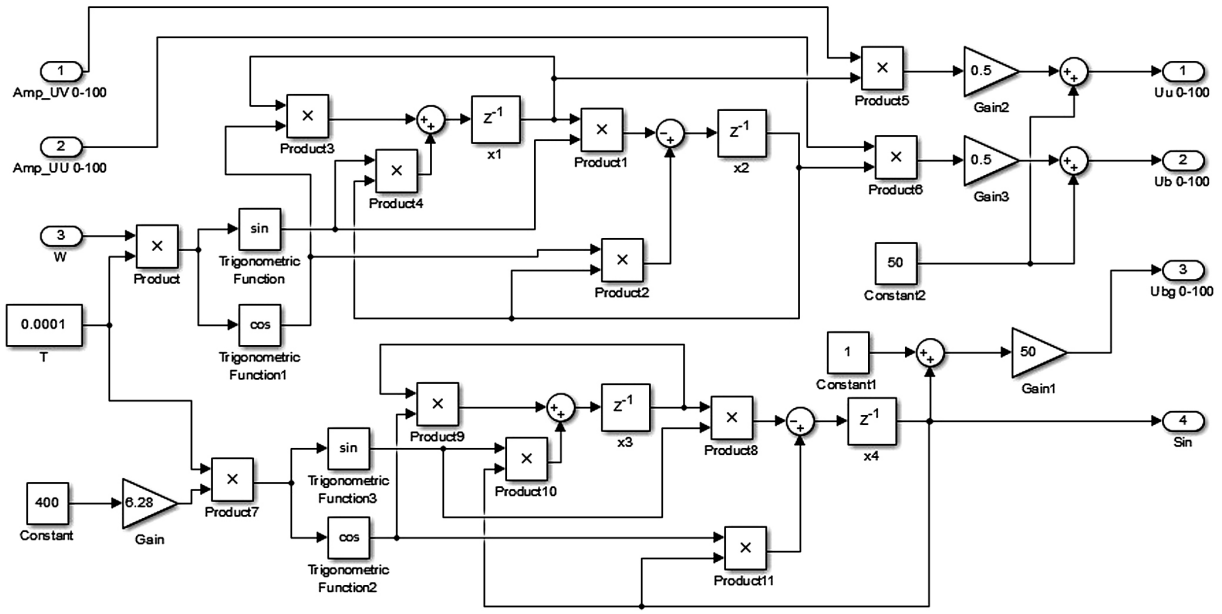


Рис. 3. Структурная схема генератора гармонических сигналов управления и возбуждения электродвигателя и сигнала возбуждения тахогенератора

широтно-импульсный преобразователь, реализуемый на таймере TIM8 микроконтроллера. В настройках таймера установлен период генерируемого ШИМ сигнала 0,0001 с. Выходы таймера (прямой и инверсный широтно-импульсные сигналы) внешними соединениями подключены к входам двухканального силового драйвера L298N. Этот мостовой драйвер, питаясь от источника 36 В постоянного тока, обеспечивает подачу переменных напряжений на обмотки управления и возбуждения. Осциллографирование выходных сигналов показало, то драйвер хорошо работает на частоте ШИМ 10 кГц. Отдельный служебный бинарный сигнал с выхода PD15 (рис. 2) микроконтроллера подан на входы разрешения работы каналов силовых драйверов. Он используется для дистанционного выключения драйверов и позволяет реализовать режим «Пуск/Стоп» двигателя.

Сигнал тахогенератора стенда подключен к входу AN3 аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера. Этот сигнал переменного тока частотой 400 Гц внешним резистивным делителем со смещением нулевой точки приведен к диапазону работы АЦП 0–3,3 В. В настройке модуля АЦП установлен период работы, равный 0,0001 с. Оцифрованное значение скорости вращения смещается по уровню, проходит программно реализованные выпрямитель и дискретный сглаживающий фильтр. Диапазон изменения скорости вращения масштабирующим коэффициентом приведен к одному байту (т. е. к диапазону чисел 0–255 у. е.). Отметим, что выпрямитель и сглаживающий фильтр также реализованы обычными средствами MatLab/Simulink.

Для связи стенда с компьютером при проведении экспериментов использован порт последовательной передачи данных UART1 микроконтроллера. Скорость передачи данных выбрана равной 115 200 бод. Прием и передача данных ведется пакетами с периодом 0,01 с. На рис. 5, *а* для примера показана панель настройки приемника данных последовательной линии связи. Кроме стартового и стопового байта (служебных) пакет содержит три байта данных формата Int8.

Первый байт данных может принимать только два значения: 1 – разрешает работу, 0 – запрещает работу силовых драйверов установки. На схеме модели (рис. 4) эта функция реализуется соединением первого выхода (верхнего на схеме) блока с линией порта PD15 микроконтроллера.

Второй информационный байт содержит информацию о заданном значении амплитуды сигнала управления двигателем. Используемый диапазон изменения данных (формат сигнала – 1 байт) – от 100 до +100 %.

Последний информационный байт содержит половинное значение заданной частоты $f/2$ [Гц] сигналов управления и возбуждения электродвигателя. Выбранный формат пакета при необходимости может быть легко изменен в панели настройки приемника UART1 Rx. Выбран-

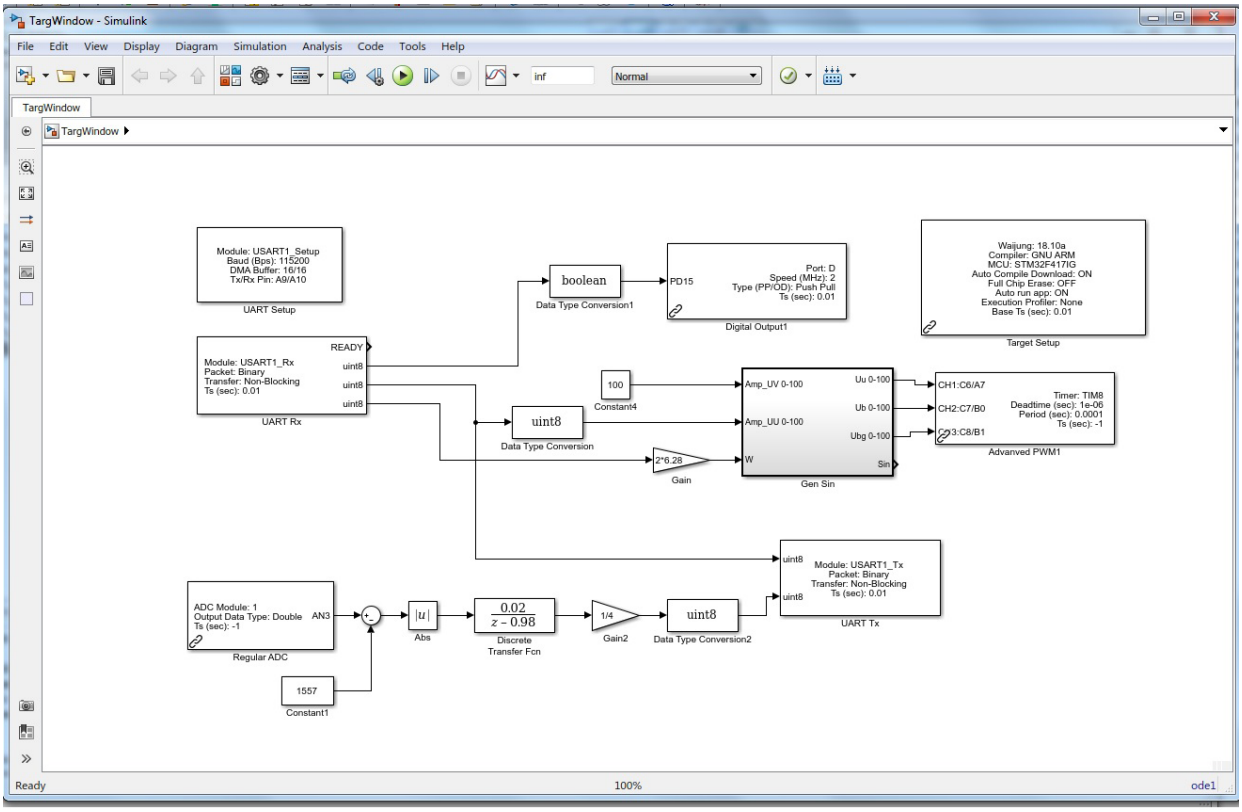


Рис. 4. Модель формирования сигналов управления и контроля электродвигателя

ная частота передачи данных 115 200 бод при периоде передачи 0,01 с позволяет включать в пакет десятки байт для обмена данными.

На рис. 5, *б* для примера показана панель настройки передатчика данных последовательной линии связи. Кроме стартовых и стоповых байт (служебных), пакет содержит два байта данных формата Int8. Первый байт является контрольным. Он передается обратно в компьютер и содержит принятое из линии связи значение амплитуды сигнала управления электродвигателем. Второй байт содержит значение скорости вращения ротора электродвигателя.

В общих настройках окна Target во вкладке Simulation/Model Configuration Parameters устанавливаем Solver options Type: Fixed-step и ниже Fixed-step size (fundamental sample time): 0,0001. Кнопкой Build Model вызывается процедура трансляции программы и загрузка ее в микроконтроллер. После окончания загрузки программа запускается автоматически. Таким образом, программирование микроконтроллера под решаемую задачу не требует дополнительных затрат времени и специальных программных продуктов. Это обстоятельство позволяет существенно экономить учебное время.

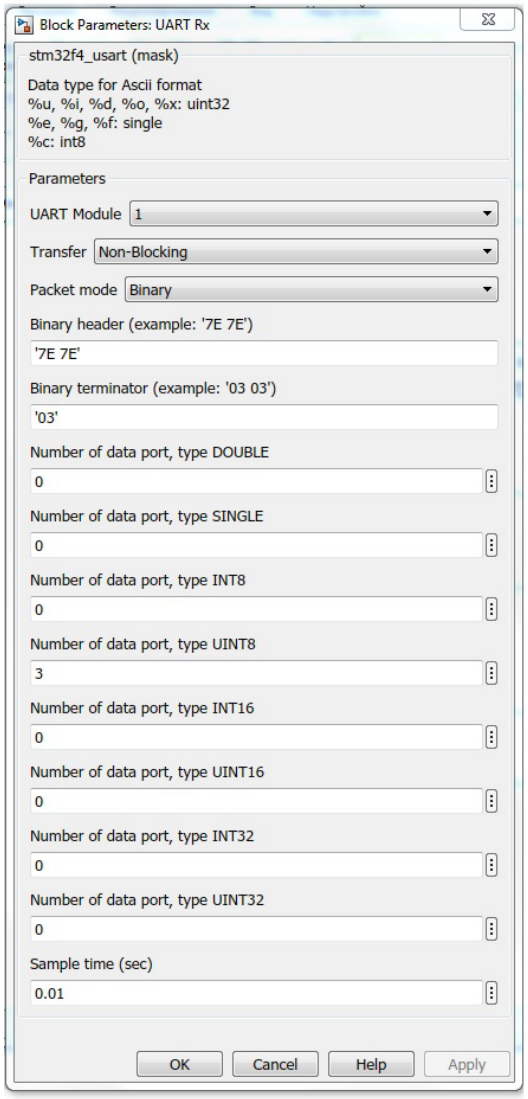
Окно Host программы работы компьютера

Задача второго окна – реализация плана эксперимента со стендом. При работе с реальным оборудованием требуется уделить особое внимание реализации задачи в режиме реального времени. В этой связи напомним, что в силу своей многозадачности и особенностей организации операционная система Windows принципиально не может работать в режиме реального времени. Поэтому, начиная еще с ранних версий MatLab, были разработаны и включены в его состав несколько инструментов для обхода указанного ограничения Windows. В рассматриваемом примере использован инструмент Simulink Desktop Real-Time. Для использования указанного инструмента в главном окне MatLab однократно следует выполнить команду (Help MatLab):

```
>> sldrtkernel - setup.
```

Эта команда запускает специальное вычислительное ядро реального времени, которое вклинивается в работу компьютера, исполняет задачу пользователя в реальном времени вне операционной системы Windows, а оставшееся время отдает задачам системы Windows.

а)



б)

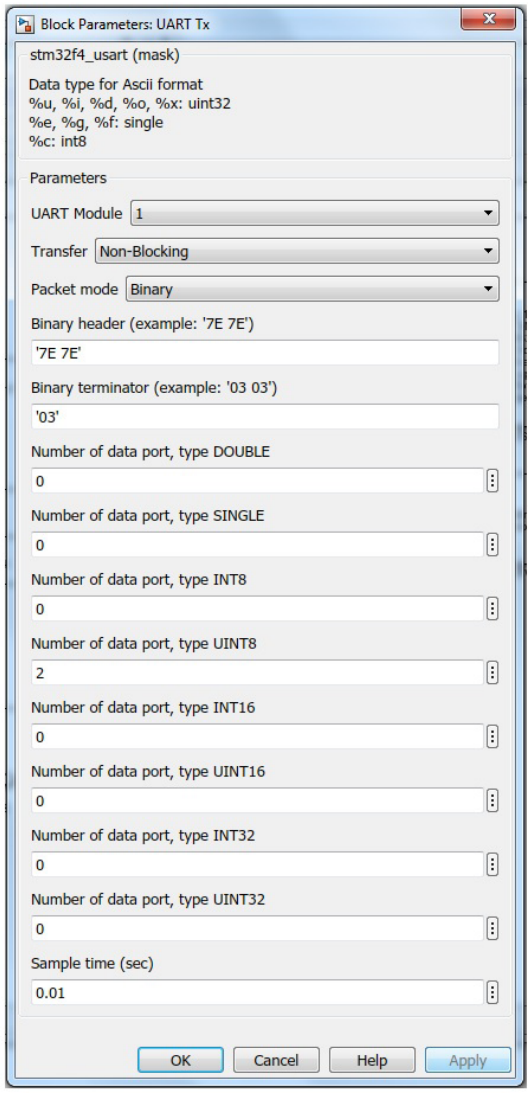


Рис. 5. Панели настройки приемника (а) и передатчика (б) последовательной линии связи

При этом исходные данные задачи ядра и получаемые результаты передаются в исходную модель Simulink и могут отображаться на экране монитора под управлением Windows. Таким образом, рассматриваемый инструмент позволяет обеспечить работу в режиме реального времени специальным образом оформленных моделей Simulink.

Окно Host управления стендом для одного из возможных экспериментов показано на рис. 6. Для задания режима реального времени в окно Host помещен блок Real-Time Sync из папки Simulink Desktop Real-Time. В настройках этого блока следует установить требуемое значение периода квантования времени. В рассматриваемом примере это период передачи пакетов по линии связи – 0,01 с. В общих настройках окна Host во вкладке Simulation/Model Configuration Parameters также устанавливаем Solver options Type: Fixed-step и ниже – Fixed-step size (fundamental sample time): 0,01.

Далее из корневой папки Waijun / Communication /Host Serial Port следует поместить в модель блок настройки последовательного порта Host Serial Setup. Окно настройки этого блока показано на рис. 7, *а*. В этом окне следует установить номер используемого виртуального COM-порта. Этот номер появляется в Панели управления/Система/Диспетчер устройств после физического подключения модуля USB-Serial к компьютеру. Также следует установить скорость передачи данных (115 200 бод) и период посылки пакетов – 0,01 с.

Из корневой папки Waijung/Communication/Host Serial Port помещаем в модель также блоки передатчика и приемника последовательной

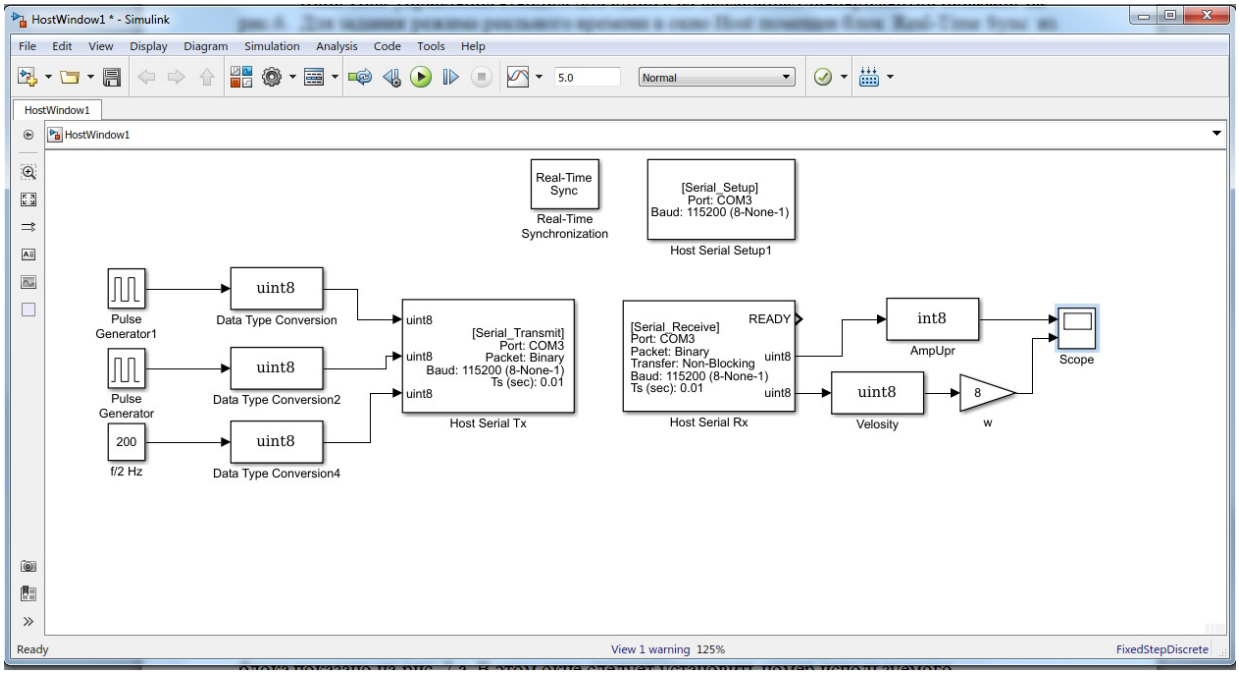


Рис. 6. Пример окна Host программы работы компьютера

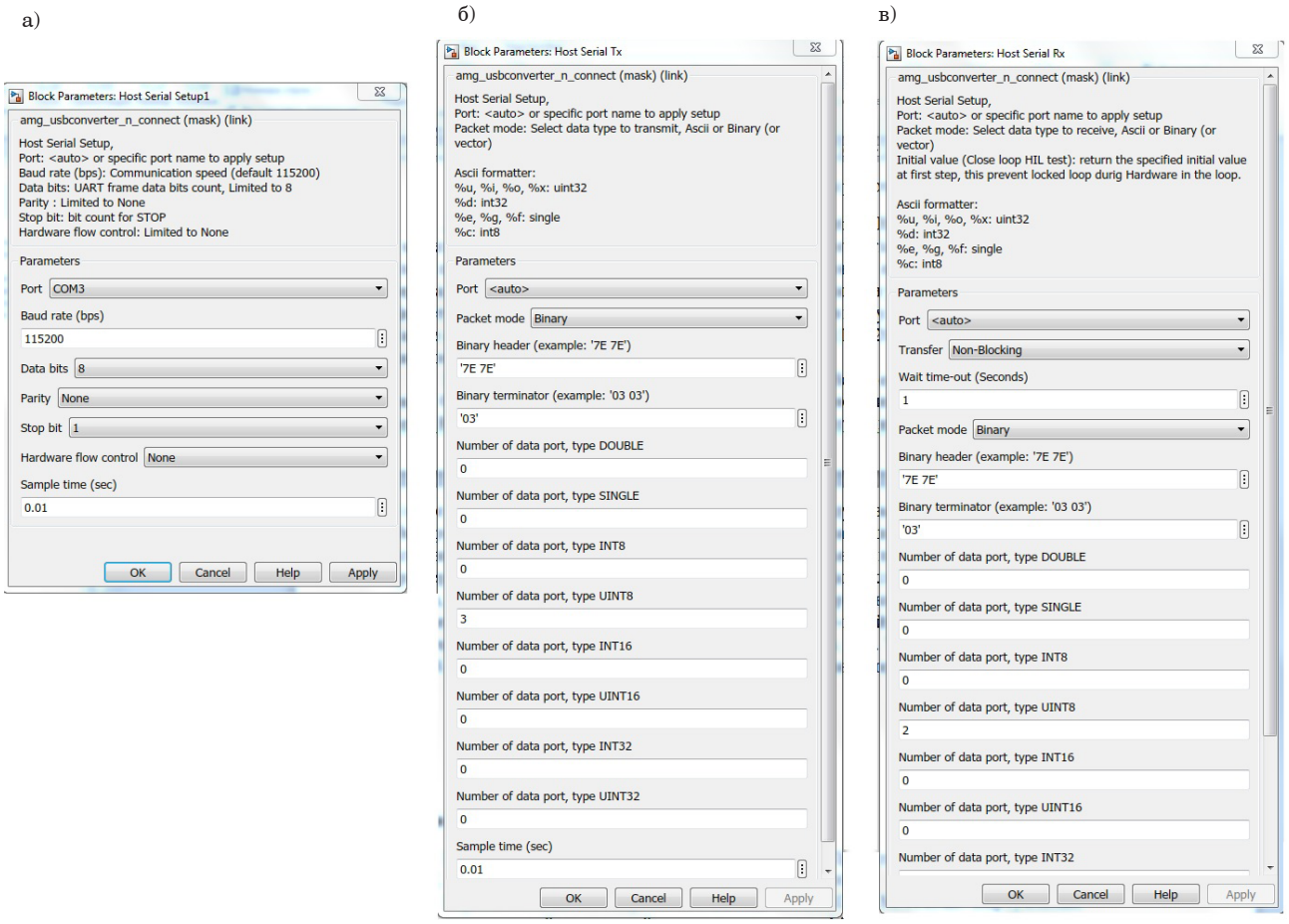


Рис. 7. Окна настройки параметров виртуального COM-порта компьютера: а – общие настройки; б – настройки передатчика; в – настройки приемника

линии связи: Host Serial Tx и Host Serial Rx. В окнах настройки этих блоков следует задать принятые форматы пакетов данных. В поле Port указываем COM3. В окне Packet mode следует выбрать формат данных – Binary (бинарные данные). Окна заголовка (Binary header) и завершения пакета (Binary terminator) устанавливаем так же, как в настройках последовательного порта окна Target. В данном примере завершает пакет передача одного байта 03. Далее следует установить структуру пакета, аналогично настройкам последовательного порта окна Target. На рис. 7, *б* показан вариант настройки структуры пакета передатчика из трех байт данных формата UINT8 (целочисленный байт без знака). Пакет приемника (рис. 7, *в*) содержит два байта формата UINT8. В последнем окне Simple time следует установить период передачи пакетов – 0,01 с.

Для проведения простых экспериментов достаточно задать входные сигналы блока Host Serial Tx, а также обработать ответные сигналы блока Host Serial Rx. Так, в примере на рис. 6 на первый вход Host Serial Tx подан единичный импульс длительностью 5 с, разрешающий работу драйверов стенда (см. описание окна Target). На второй вход подан импульс длительностью 2 с и амплитудой 100 (%), задающий амплитуду сигнала управления. На третий вход подано половинное значение частоты (f/2) сигналов управления и возбуждения электродвигателя.

Ответные сигналы стенда с выходов блока приемника подключены к входам осциллоскопа Scop. Как определено в окне Target, первый сигнал передает для контроля величину управляющего напряжения (в %), второй – значение скорости вращения ротора электродвигателя в соответствующем масштабе. Для учета масштаба сигнала скорости при отображении его на блоке Scope использован блок Gain. Сопряжение форматов данных блоков Simulink и данных пакета осуществляется с помощью блоков Data Type Coversion пакета Simulink.

Особо отметим режим работы окна Host. Режим реального времени поддерживается в Симулинк только для фиксированного периода квантования времени. Поэтому в настройке Simulation в папке Model Cofiguration Parameters следует установить параметр Solver options Type – Fixed-step. В поле Additional options следует установить значение Fixed-step size (fundamental sample time), равное 0,01 с.

Примеры экспериментов по управлению электродвигателем

Управление электродвигателем стенда возможно по трем каналам передачи воздействий – каналу изменения амплитуды сигнала на обмотке возбуждения, каналу изменения амплитуды сигнала на обмотке управления, а также путем изменения частоты питающих напряжений. В системах управления применяют все три канала передачи воздействий.

Самый простой эксперимент – прямой пуск электродвигателя при номинальной частоте питающего напряжения. Окно Host модели

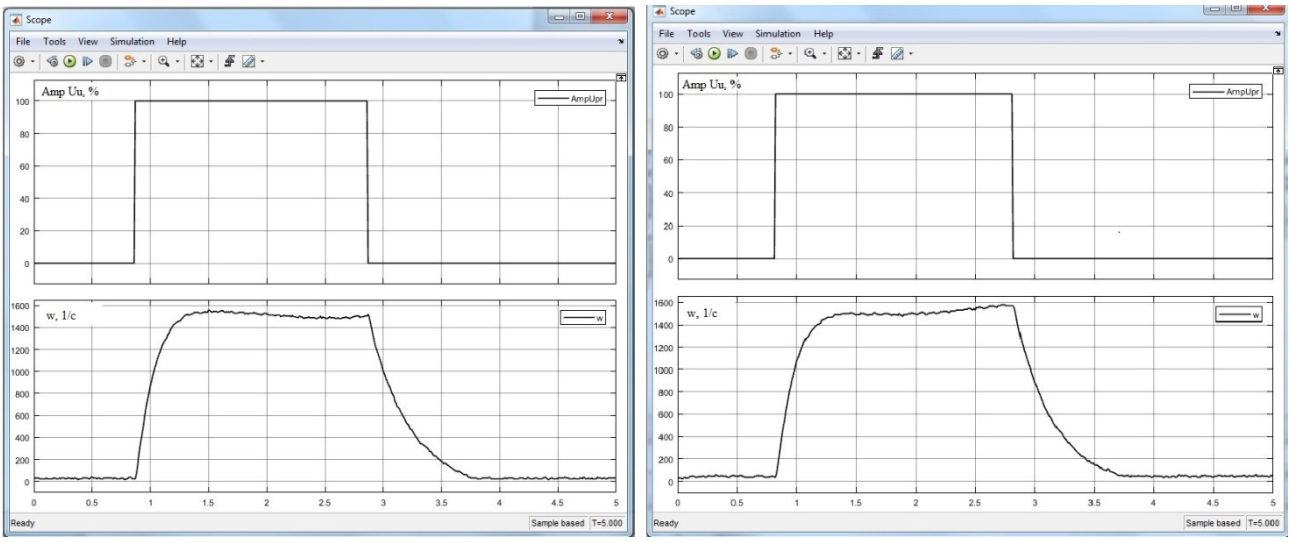


Рис. 8. Кривые разгона и выбега при амплитуде управления 100 %-й и частоте питающих напряжений 400 Гц – примеры вариации

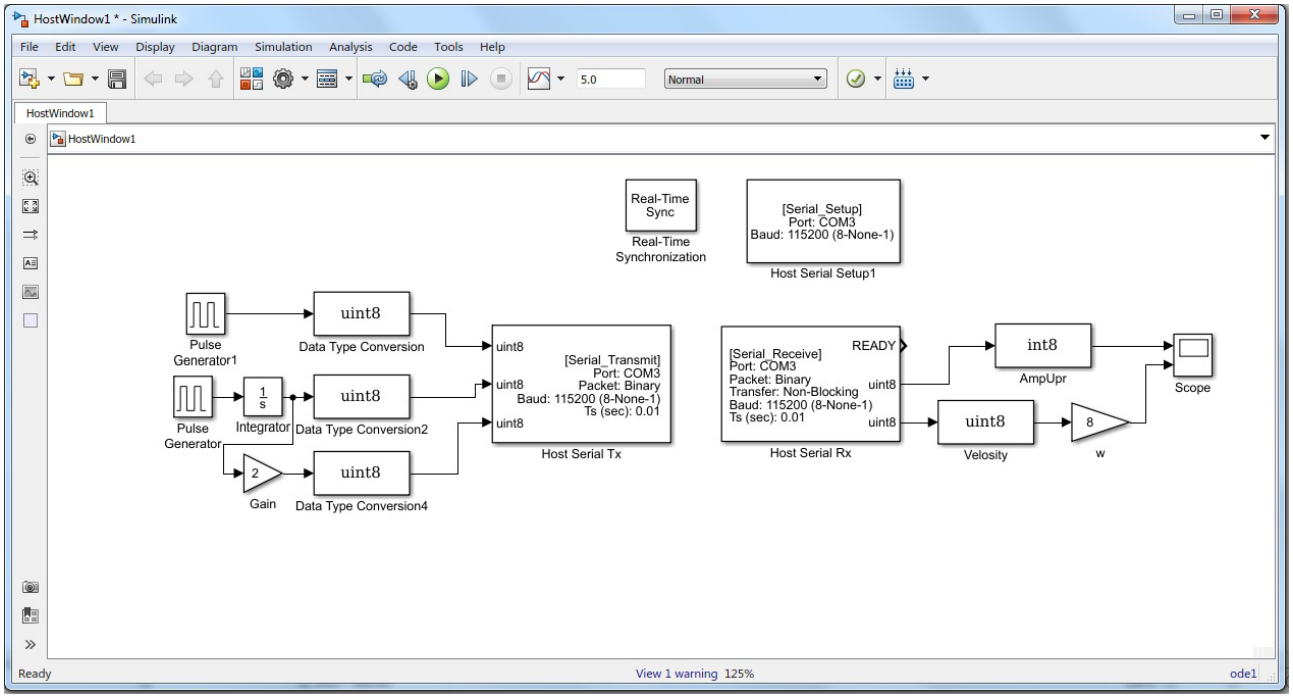


Рис. 9. Окно Host эксперимента по плавному пуску электродвигателя с использованием частотного управления

эксперимента для данного случая показано на рис. 6. Для проведения экспериментов нужно задать несколько параметров – амплитуду сигнала управления, частоту питающих напряжений, длительность импульсов включенного состояния электродвигателя и времени активного действия сигнала управления. На осциллоскопе фиксируются изменение амплитуды сигнала управления и значения скорости вращения ротора электродвигателя.

На рис. 8 показаны кривые разгона и выбега двигателя при включении и выключении напряжения управления амплитудой 100 % (36 В) при частоте питающих напряжений 400 Гц. Длительность сигнала включения установки – 5 с, длительность подачи сигнала управления – 2 с. Условия эксперимента в обоих случаях одинаковые, однако от пуска к пуску наблюдается разброс установившегося значения угловой скорости вращения ротора. Наблюдаемая нестабильность мотивирует применение других способов управления электродвигателем.

Качество работы электропривода можно улучшить, применив амплитудно-частотное управление двигателем [1]. Одним из вариантов такого управления в разомкнутом электроприводе является использование закона изменения частоты питающих напряжений в соответствии с выражением:

$$w = kUu, \qquad (2)$$

где w – частота питающих напряжений; Uu – амплитуда напряжения управления; k – постоянный коэффициент. Коэффициент k может быть выбран например из условия: при 100 %-й амплитуде напряжения управления частота питающих напряжений равна 400 Гц.

Очевидно, что при простом пуске электродвигателя закон управления (2) не имеет никаких преимуществ перед обычным амплитудным управлением. Однако в задаче плавного пуска электродвигателя, когда амплитуда напряжения управления, например, линейно возрастает, закон управления (2) должен проявлять свои положительные свойства.

На рис. 9 показано окно Host модели эксперимента по плавному пуску электродвигателя с линейно-возрастающим законом амплитудно-частотного управления. Для формирования линейного закона управления использован интегратор пакета MatLab/Simulink. Интегрирование с фиксированным периодом квантования 0.01 с. выполняется классическим методом Эйлера. В законе частотного управления (2) использован коэффициент $k = 2$, который получается с учетом принятого масштаба передаваемых данных по линии связи.

На рис. 10 показаны кривые плавного разгона электродвигателя. На рис. 10, *а* показан разгон двигателя при частотном управлении. Для сравнения на рис. 10, *б* показан плавный разгон двигателя при изменении амплитуды сигнала

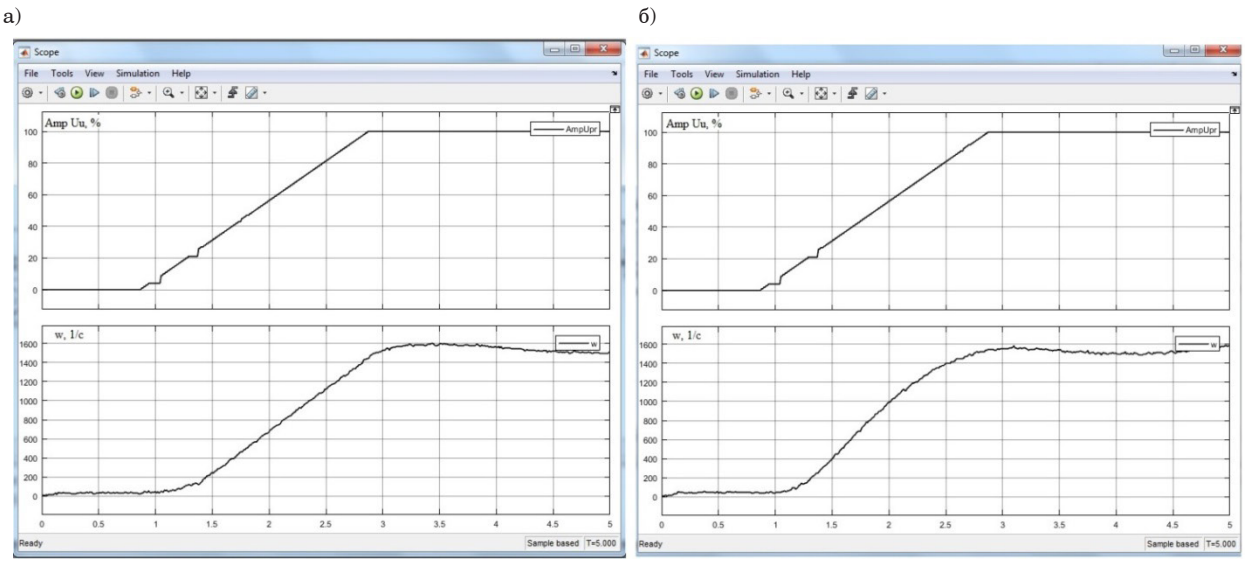


Рис. 10. Кривые плавного разгона электродвигателя при амплитудно-частотном (а) и амплитудном (б) способах управления

управления и постоянной частоте питающих напряжений 400 Гц. Нетрудно заметить, что при частотном управлении линейность кривой разгона выше, чем при обычном амплитудном управлении. Как известно, это связано с увеличением жесткости механической характеристики привода при частотном управлении. Также следует обратить внимание, что контроль кривой сигнала управления на рис. 10 фиксирует наличие сбоев передачи данных по линии связи, что подтверждает целесообразность использования принятого механизма контроля в экспериментах.

Рассмотрим также проведение экспериментов с электроприводом, замкнутым обратной связью по скорости вращения ротора. Рассмотрим для

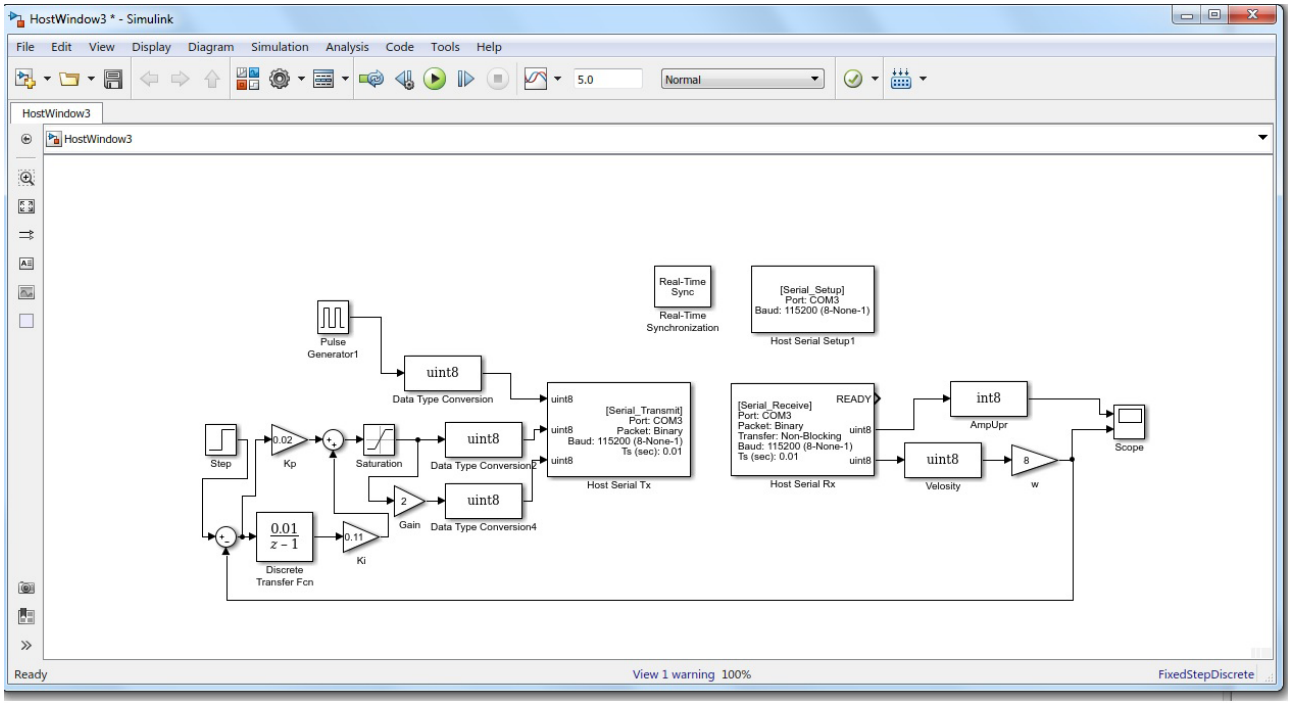


Рис. 11. Пример реализации ПИ-регулятора замкнутого электропривода в окне Host

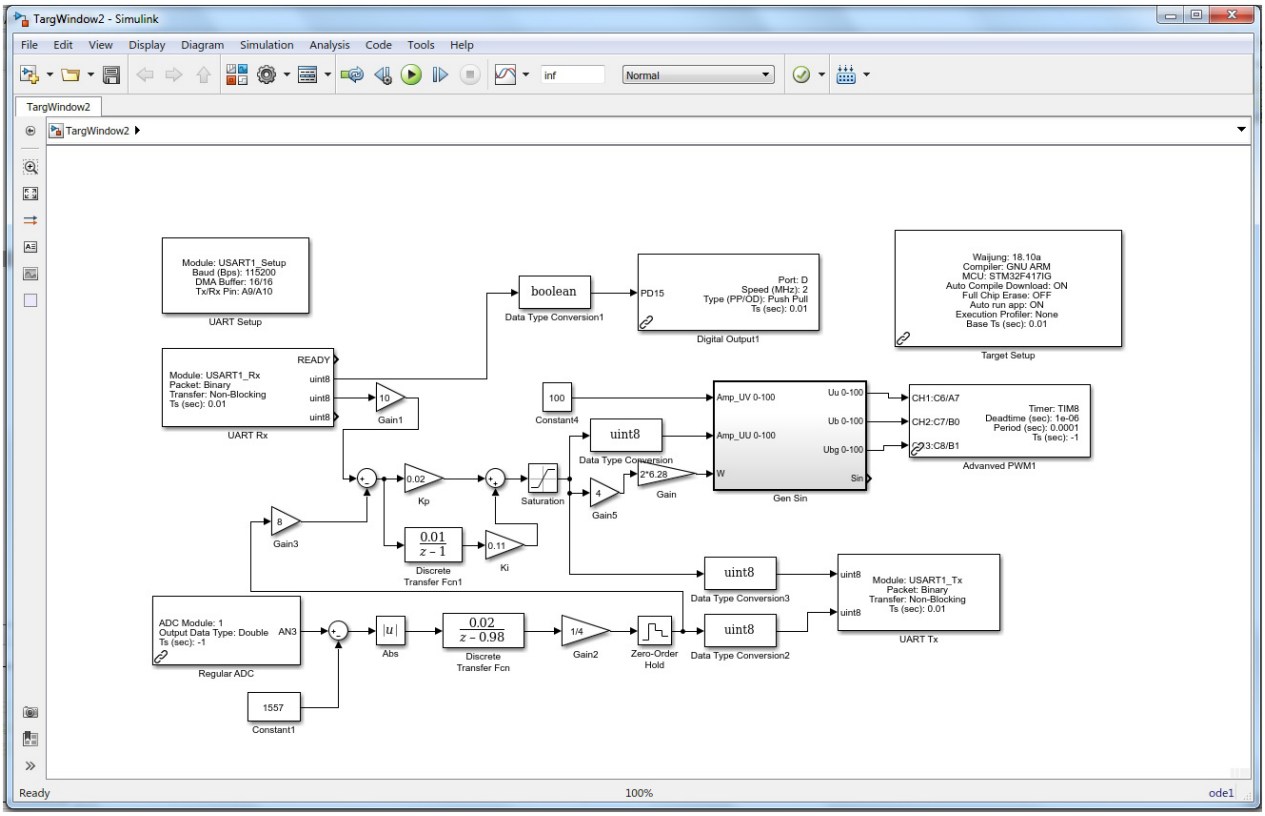


Рис. 12. Пример реализации ПИ-регулятора замкнутого электропривода в окне Target

примера цифровую реализацию классического ПИ-регулятора. Этот регулятор может быть реализован в двух вариантах: либо в виде алгоритма в окне Host, либо в виде алгоритма в окне Target. Оба окна поддерживают режим реального времени и в этом смысле они эквивалентны. Однако реализация алгоритма в окне Taget должна давать более стабильный результат, так как в этом случае в контуре системы управления отсутствует линия последовательной передачи данных с ее задержками и сбоями.

На рис. 11 показан пример реализации ПИ-регулятора в окне Host. В настройках блока Step установлено значение заданной скорости вращения ротора равное 800 1/с. Цифровое интегрирование выполняется по методу Эйлера с периодом квантования времени 0,01 с. В регуляторе применены настройка с параметрами $Kp = 0{,}02$, $Ki = 0{,}11$ и управление амплитудно-частотное управление двигателем. Переходной процесс в системе регулирования показан на рис. 13, *а*.

На рис. 12 для сравнения показана альтернативная модель реализации ПИ-регулятора в окне Target. Заданное значение скорости вращения поступает на регулятор по линии связи из окна Host. Обратно в окно Host значение управляющего сигнала с выхода ПИ-регулятора и текущее значение скорости вращения ротора. Параметры регулятора аналогичны предыдущему случаю, цифровое интегрирование выполняется по методу Эйлера с периодом квантования времени 0,01 с. Применено и амплитудно-частотное управление электродвигателем. Другими словами, с учетом масштабов используемых переменны, регулятор в окне Target (рис. 12) полностью идентичен регулятору в окне Host (рис. 11). Переходной процесс в системе регулирования показан на рис. 13, *б*.

Сравнение переходных процессов показывает, что несмотря на идентичность структур и параметров регулятора наличие линии последовательной связи в контуре системы управления (рис. 13, *а*) заметно сказывается на качестве переходного процесса. Заметны также и сбои в работе линии связи. Регулятор, реализованный непосредственно в микроконтроллере (рис. 13, *б*), имеет заметно лучшее качество регулирования.

Заключение

В настоящее время в программах подготовки специалистов широко используются мето-

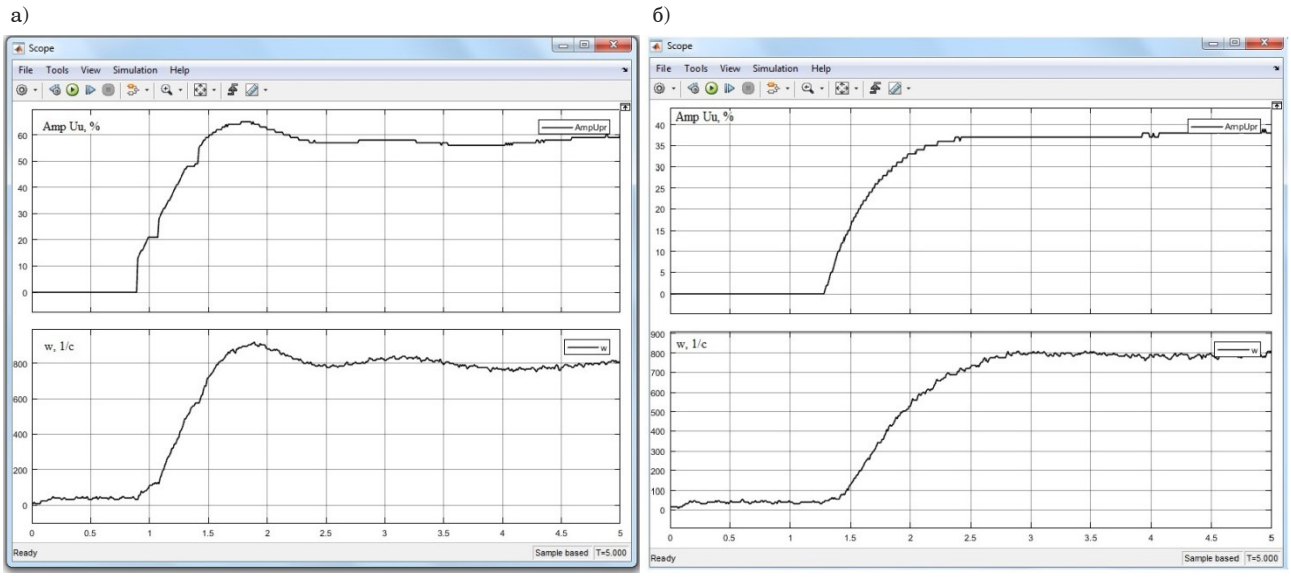


Рис. 13. Переходные процессы в системах управления приводом с ПИ-регулятором: а – реализация регулятора в окне Host; б – реализация регулятора в окне Target

ды исследования, построенные на базе виртуальных компьютерных моделей объектов. Для многих объектов, в том числе и электродвигателей, разработаны достаточно подробные компьютерные модели. Однако метод моделирования обязательно строится на идеализированных и приближенных свойствах объектов. В частности, при исследовании электропривода в моделях используют следующие допущения [1]:

– не учитываются нелинейные эффекты, связанные с намагничиванием машины при различных питающих напряжениях;

– пространственное распределение магнитного поля в зазоре машины обычно считается неискаженным гармоническим;

– параметры машины считаются постоянными независимо от режимов работы.

В то же время имеется достаточно большая и доступная база аппаратно-программных средств, позволяющая без особых затрат времени и средств проводить исследования с реальными физическими объектами, обходя указанные выше допущения. В частности, инструменты MatLab/Simulink с использованием внешней библиотеки Waijung позволяют быстро и достаточно легко решить задачу генерации кода работы микроконтроллера и организовать сбор и обработку данных в режиме реального времени. Рассмотренные в работе примеры экспериментов с цифровым электроприводом демонстрируют перспективность использования указанных инструментов для широкого применения в учебном процессе с целью улучшения инженерной подготовки современных специалистов, бакалавров и магистров.

Список источников

1. *Герман-Галкин С. Г.* MATLAB & SIMULINK. Проектирование мехатронных систем на ПК: учеб. пособие для вузов. СПб.: КОРОНА-Век, 2008.

2. Решение прикладных задач теории управления в Матлаб: учеб. пособие / Н. В. Смирнов [и др.]. СПб.: СОЛО, 2013. 186 с.

3. Уроки Матлаб. URL: https://www.youtube.com/@Exponenta-tech (дата обращения: 03.10.2023)

4. Запуск моделей Симулинк на аппаратных платформах. URL: https://hub.exponenta.ru/post/zapusk-modeley-simulink-na-apparatnykh-platformakh82 (дата обращения: 27.04.2023).

5. STM32F4-Discovery: Быстрое прототипирование алгоритмов. URL: https://www.youtube.com/watch?v=5M7EAZjwPj0 (дата обращения: 03.10.2023)

6. Tom Egan Running Simulink Model on an Arduino in External Mode. URL: https://arduino.scholar.bucknell.edu/2019/06/18/running-simulink-model-on-an-arduino-in-external-mode/ (дата обращения: 27.04.2023).

7. *Hmidet A., Boubaker O.* Real-time low-cost speed monitoring and control of three-phase induction motor via a voltage/frequency control approach // Mathematical problems in engineering. 2020. Vol. 2020. Article ID: 6913813. URL:

https://doi.org/10.1155/2020/6913813 (дата обращения: 03.10.2023)

8. Прототипирование цифровых систем управления пакетными пьезоактюаторами / В. И. Бойков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 10. С. 900–906.

9. *Герман-Галкин С., Гаврилов Р., Батлин Н.* Школа MATLAB. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB+Simulink. Урок 22: Автоматическая генерация исполняемого кода средствами MATLAB+Simulink // Силовая электроника. 2017. № 2. С. 72–78.

10. *Hmidet A., Hasnaoui O.* Waijung blockset-STM32F4 environment for real time induction motor speed control // IEEE 5th International congress on information science and Technology (CiSt). IEEE, Marrakech, Morocco, 2018. P. 600–605.

11. Aimagin. URL: https://www.aimagin.com/waijung-1-stm32-target.html (дата обращения: 05.09.2023).

УДК 681.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-139-145**

М. С. Брунов*
старший преподаватель
В. И. Гончарова*
старший преподаватель
Е. Ю. Ватаева*
старший преподаватель
Д. В. Шишлаков*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ АППРОКСИМАЦИИ НЕЛИНЕЙНОГО ЗВЕНА ИРРАЦИОНАЛЬНОЙ ФУНКЦИЕЙ

Рассматривается аппроксимация нелинейного звена иррациональной функцией. Модели, полученные с помощью аппроксимации иррациональной функцией, сравниваются с моделями, полученными при аппроксимации полиномами. Приводятся результаты вычислительных экспериментов в MatLab, подтверждающие эффективность рассмотренного вида аппроксимации.
Ключевые слова: *системы автоматического управления, нелинейная система, статическая нелинейность, аппроксимация полиномами, аппроксимация иррациональной функцией.*

M. S. Brunov*
Senior Lecturer
V. I. Goncharova*
Senior Lecturer
E. Yu. Vataeva*
Senior Lecturer
V. F. Shishlakov*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

STUDYING THE DYNAMICS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM WHEN APPROXIMATING A NONLINEAR LINK BY AN IRRATIONAL FUNCTION

The approximation of a nonlinear link by an irrational function is considered. Models obtained using irrational function approximation are compared with models obtained using polynomial approximation. The results of computational experiments in MatLab are presented, confirming the effectiveness of the considered type of approximation.
Keywords: *automatic control system, nonlinear system, static nonlinearity, approximation by polynomials, approximation by irrational function.*

Цель работы – продемонстрировать эффективность метода аппроксимации нелинейностей с помощью иррациональной функции. В качестве тестового объекта рассматривается звено насыщения. Проводится сравнение с моделями, полученными с помощью полиномов. Рассматриваются модели, полученные при разных входных воздействиях. Анализируется влияние вида аппроксимации на динамику типовой системы автоматического управления (САУ). Приводятся результаты вычислительных экспериментов в MatLab, подтверждающие эффективность рассмотренного вида аппроксимации.

Аппроксимация нелинейных звеньев полиномами позволяет получать приемлемые по точности модели для довольно широкого круга объектов [1–3]. Однако нередко для получения адекватной модели требуется применение полиномов достаточно высокой степени, что может приводить к вычислительным трудностям на последующих этапах исследования. Ап-

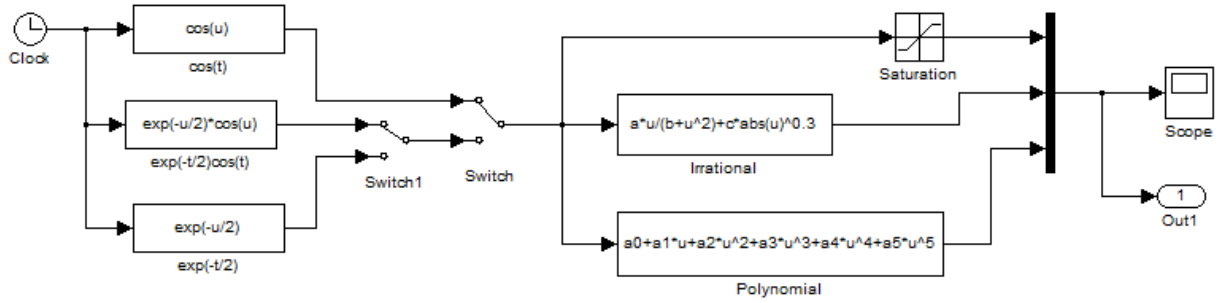


Рис. 1. Схема для сравнения моделей для двух видов аппроксимации при разных входных воздействиях

проксимация иррациональной функцией, хотя, безусловно, не может претендовать на подобную универсальность, в ряде случаев позволяет обеспечить не меньшую точность без повышения порядка модели.

В данной работе исследуются модели статической нелинейности вида «насыщение» (далее – saturation), полученные при двух разных видах аппроксимации. Звено насыщение имеет следующие параметры:

$$y(x) = -c, x < b; \quad x, |x| < b; \quad c, |x| \geq b, \qquad (1)$$

где $c = 0{,}4$; $b = 0{,}4$

Модель, полученная при аппроксимации с помощью иррациональной функции (далее – АИ-модель), задается следующим математическим выражением:

$$f_1(x) = \frac{Ax}{B + x^2} + C|x|^{0,3}, \qquad (2)$$

где x – сигнал на входе нелинейности; $f_1(x)$ – сигнал на выходе нелинейности; A, B и C – коэффициенты модели, подлежащие определению в процессе идентификации [2]. Сравнение проводилось с моделями, полученными при аппроксимации полиномами 4–5-го порядков, которые были рассмотрены в работе [3].

Модель, полученная при аппроксимации с полиномами (далее – АП-модель), задается следующим математическим выражением:

$$f_2(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + a_5 x^5, \qquad (3)$$

где x – сигнал на входе нелинейности; $f_2(x)$ – сигнал на выходе нелинейности; a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – коэффициенты модели, подлежащие определению в процессе идентификации. Если модель имеет 4-й порядок, то $a_5 = 0$.

Сравнение проводилось при следующих трех входных сигналах: $x(t)=\cos(t)$, $x(t)=\exp(-t/2)\cos(t)$, $x(t)=\exp(-t/2)$.

Схема для сравнения моделей в программе MatLab Simulink приведена на рис. 1.

На рис. 2–7 показаны результаты сравнения моделей, полученных при аппроксимации иррациональной функцией (2), и моделей, полученных при аппроксимации полиномами четвертого порядка (3) с идеальным звеном *saturation* (1).

Параметры АИ-модели: A=0,5857, B=0,5, C=0,0005.

Параметры АП-модели: a_0=0,0021, a_1=0,8936, a_2=–0,0246, a_3=–0,5354, a_4=0,0329.

По рис. 2; 3 можно сделать вывод, что модель, полученная при иррациональной аппроксимации при гармоническом сигнале на входе нелинейности, выглядит более точной, чем соответствующая модель, полученная при аппроксимации полиномами. Это подтверждается и вычислениями: средняя квадратическая ошибка АИ-модели равна 0,0134, а средняя квадратическая ошибка АП-модели – 0,0332.

Параметры АИ-модели: A=0,5667, B=0,5, C=0,0085.

Параметры АП-модели: a_0=–0,0005, a_1=1,1097, a_2=0,0724, a_3=–2,0653, a_4=1,2858.

По рис. 4; 5 можно сделать вывод о том, что модели, полученные при затухающей экспоненте на входе, при разных видах аппроксимации, визуально мало различимы. Это подтверждается и вычислениями: средняя квадратическая ошибка АИ-модели равна 0,0088, а средняя квадратическая ошибка АП-модели – 0,0072.

Параметры АИ-модели: A=0,6435, B=0,5, C=–0,0427.

Параметры АП-модели: a_0=0,.0021, a_1=0,8623, a_2=1,6538, a_3=–4,9324, a_4=2,8408.

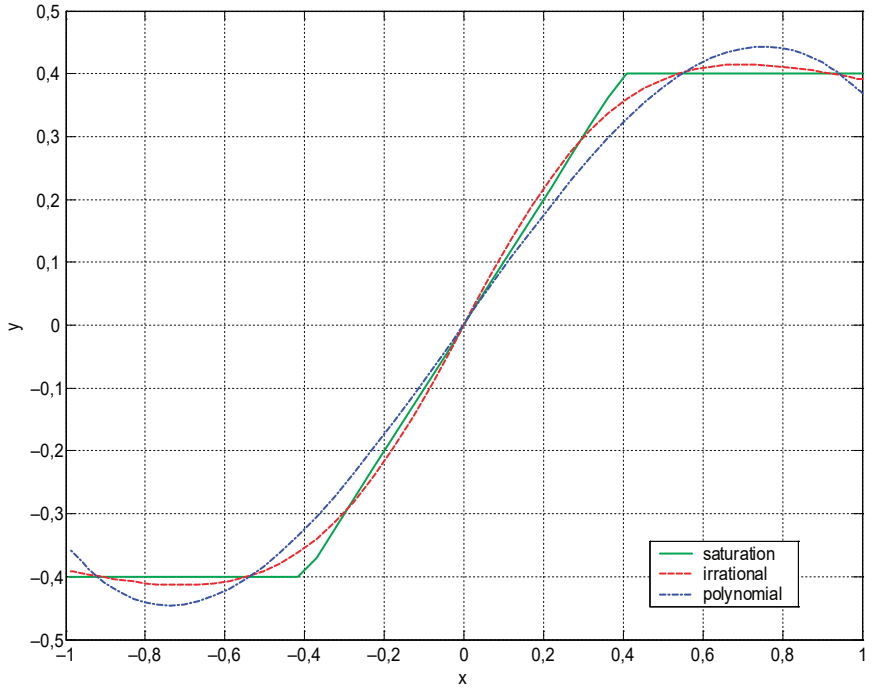


Рис. 2. Сравнение моделей при гармоническом сигнале на входе нелинейностей $x(t) = \cos(t)$

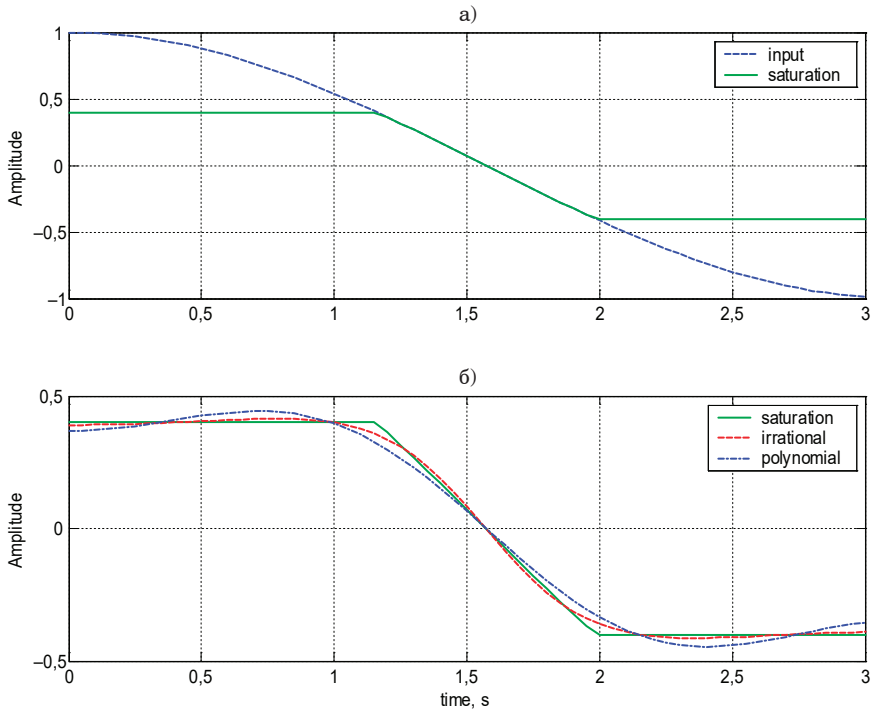


Рис. 3. Модели при гармоническом сигнале на входе нелинейностей (сверху – вход и выход звена saturation, снизу – сравнение выходов идеального звена и моделей)

По рис. 6; 7 можно сделать вывод о том, что модель, полученная при иррациональной аппроксимации при экспоненциальном сигнале на входе нелинейностей, выглядит несколько менее точной, чем соответствующая модель, полученная при аппроксимации полиномами. Это подтверждается и вычислениями: средняя квадратическая ошибка АИ-модели равна 0,113, а

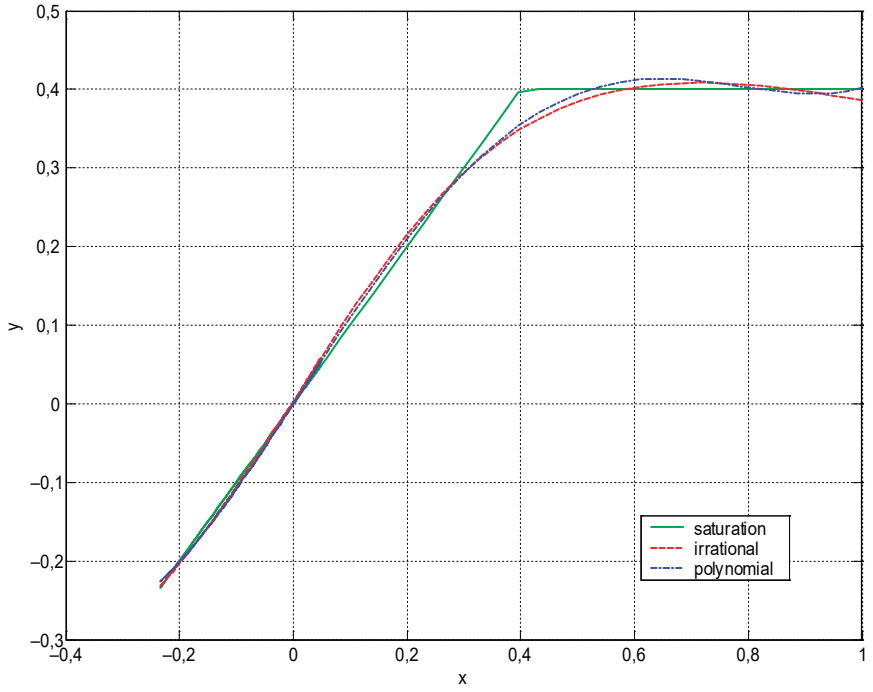


Рис. 4. Сравнение моделей при затухающей экспоненте на входе нелинейностей $x(t) = \exp^{-t/2}\cos(t)$

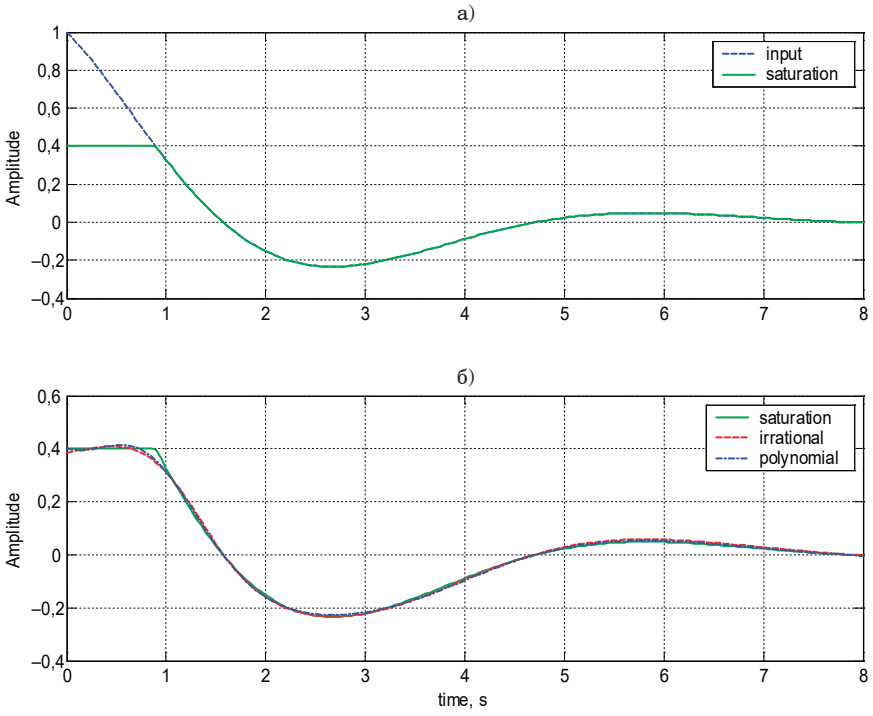


Рис. 5. Модели при затухающей экспоненте на входе нелинейностей (сверху – вход и выход звена saturation, снизу – сравнение выходов идеального звена и моделей)

средняя квадратическая ошибка АП-модели – 0,0081.

Таким образом, при самых грубых оценках, можно сделать вывод, что при данных условиях эксперимента и выбранных параметрах аппроксимации, модели, полученные при иррациональной аппроксимации, сопоставимы по точности с моделями, полученны-

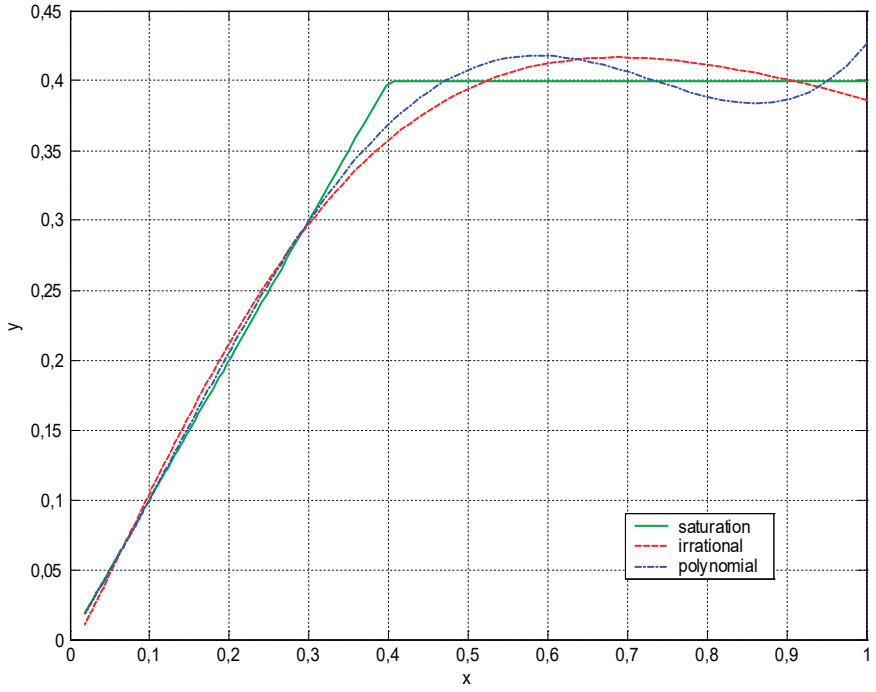


Рис. 6. Сравнение моделей при экспоненциальном сигнале на входе нелинейностей $x(t) = \exp^{-t/2}$

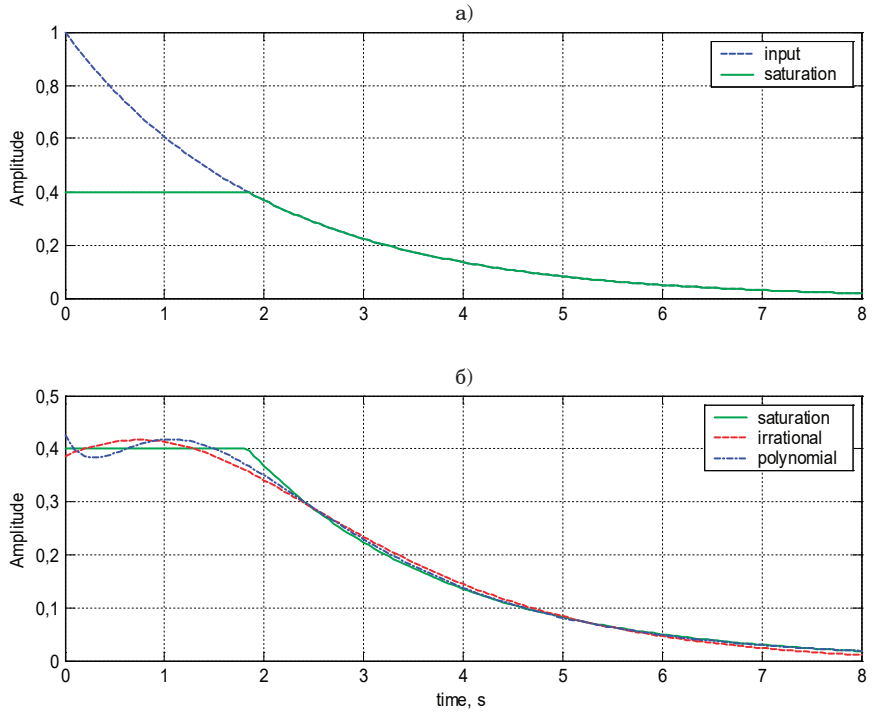


Рис. 7. Модели при экспоненциальном сигнале на входе нелинейностей (сверху – вход и выход звена saturation, снизу – сравнение выходов идеального звена и моделей)

ми при аппроксимации полиномами четвертой степени.

До этого момента мы рассматривали модели изолированно. Представляется интересным исследовать их поведение в том случае, когда они являются частью типовой системы управления. Пусть задана непрерывная система с пропорционально-интегрально-дифференцирующим

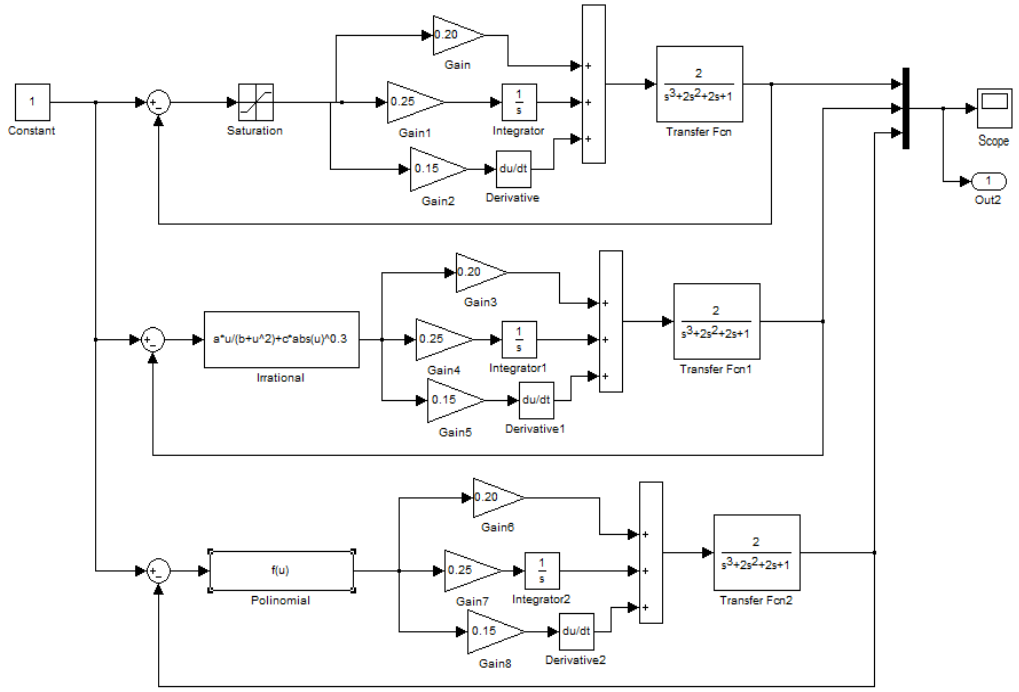


Рис. 8. Схема для сравнения выходов систем, содержащих нелинейности, полученные при разных видах аппроксимации

(ПИД) регулятором, содержащая статическую нелинейность.

Рассмотри еще две системы: в первой заменим нелинейный элемент моделью, полученной при иррациональной аппроксимации, а во второй – моделью, полученной при полиномиальной аппроксимации. Сравним выходы систем, как это показано на рис. 8.

На рис. 8 в верхней части – система с идеальной моделью нелинейности, в средней части – система с моделью, полученной при иррациональной аппроксимации, в нижней части – си-

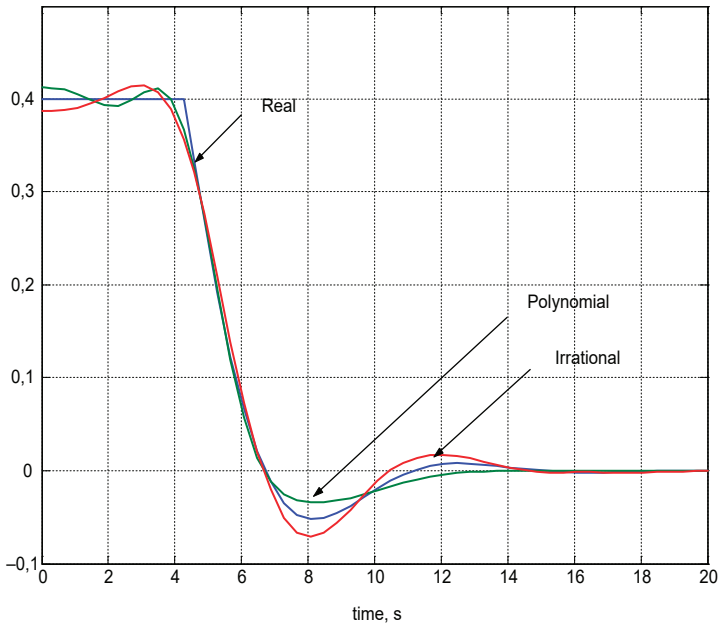


Рис. 9. Сравнение сигналов на выходе моделей нелинейностей, входящих в состав систем, изображенных на рис. 8

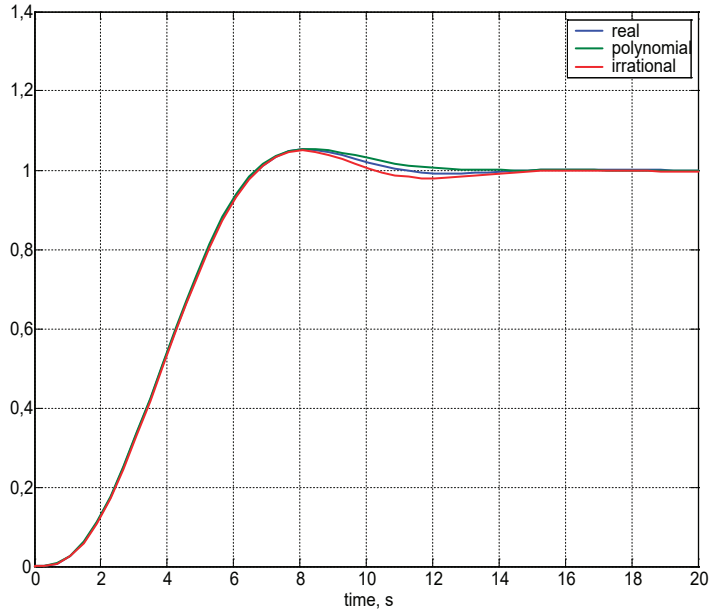


Рис. 10. Сравнение сигналов на выходах систем

стема с моделью, полученной при полиномиальной аппроксимации.

На этот раз для аппроксимации полиномами будем использовать модель пятого порядка. Сигнал входе нелинейности считаем, вообще говоря, неизвестным. Будем ориентироваться на программное движение, за которое будем принимать сигнал $y(t)=1-\exp(-t/2)$. Тогда на входе нелинейности будет сигнал $x(t)=\exp(-t/2)$.

На рис. 9 показаны переходные процессы на выходах соответствующих нелинейностей для систем, изображенных на рис. 8.

По рис. 8 можно заключить, что полиномиальные модели пятого порядка, в данном случае, дают несколько более тучную аппроксимацию.

На рис. 10 показаны переходные процессы на выходах трех рассматриваемых систем.

Отличие выходов систем визуально мало различимо, хотя выход системы с полиномиальной аппроксимацией пятого порядка дает несколько более плавный переходный процесс. Таким образом, можно предположить, что для нелинейностей рассматриваемого типа, аппроксимация иррациональной функцией сопоставима по точности с аппроксимацией полиномами 4-го, 5-го порядков.

В работе сравниваются модели нелинейного звена типа «насыщение», полученные при разных видах аппроксимации (полиномами четвертого, пятого порядков и с помощью иррациональной функции). В качестве исходных данных для идентификации используются сигналы, полученные со входов и выходов нелинейностей путем моделирования в программе MatLlab.

Показано, что при использовании моделей, рассчитанных разными методами, могут быть получены сходные результаты. Приведены примеры моделирования в пакете MatLab, иллюстрирующие перспективность метода аппроксимации с помощью иррациональной функции при синтезе систем управления.

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».

Список источников

1. *Никитин А. В., Шишлаков В. Ф.* Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: монография. СПб.: ГУАП, 2003. 358 с.

2. *Шишлаков В. Ф., Шишлаков А. В., Тимофеев С. С.* Синтез САУ при различных видах аппроксимации нелинейных характеристик: теория и практика: монография. СПб.: ГУАП, 2017. 151 с.

3. Исследование динамики САУ при изменении точности аппроксимации нелинейного звена / М. С. Брунов, Е. Ю. Ватаева, Н. Л. Гречкин, В. Ф. Шишлаков // Завалишинские чтения – 23: сб. докл. XVIII Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике (СПб., 18–19 апр. 2023 г.). СПб.: ГУАП, 2023. С. 186–189.

УДК 658.512.2 + 681.5.04 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-146-154**

А. Б. Бушуев*
кандидат технических наук, доцент
О. С. Нуйя**
кандидат технических наук, доцент
Ю. В. Литвинов**
кандидат технических наук, доцент
В. И. Бойков**
кандидат технических наук, доцент
М. В. Сержантова**
кандидат технических наук, доцент
** Национальный исследовательский университет ИТМО*
*** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИНФОРМАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАМКНУТЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассматривается метод имитационного размерного моделирования структурных схем систем автоматического регулирования. Результатом моделирования являются численные оценки для различных вариантов структуры. Для математического аппарата используется теория размерности физических величин, в частности, система кинематических величин «длина – время». Рассматривается применение метода к информационно-энергетическим схемам и структурным схемам систем регулирования, заданных дифференциальными уравнениями.
Ключевые слова: *размерное моделирование, информационно-энергетические схемы, LT-базис, ресурсоемкость, физический принцип действия.*

A. B. Bushuev*
PhD, Tech., Associate Professor
O. S. Nuya**
PhD, Tech., Associate Professor
Yu. V. Litvinov**
PhD, Tech., Associate Professor
V. I. Boikov**
PhD, Tech., Associate Professor
M. V. Sergeantova **
PhD, Tech., Associate Professor
** ITMO University*
*** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INFORMATION AND ENERGY SCHEMES IN THE DESIGN OF CLOSED AUTOMATIC SYSTEMS

The article considers the method of dimensional simulation of structural schemes of automatic control systems. The result of the simulation is numerical estimates for various variants of the structure. The mathematical apparatus uses the theory of the dimensionality of physical quantities, in particular the system of kinematic quantities "length-time". The application of the method to information and energy circuits and structural circuits of control systems specified by differential equations is considered.
Keywords: *dimensional simulation, information and energy schemes, LT-basis, resource intensity, physical operating principle.*

Введение

Целью работы является установление некоторой связи между моделями систем управления в виде информационно-энергетических схем и структурными моделями замкнутых систем стабилизации в виде передаточных функций, или дифференциальных уравнений в пространстве состояний.

Эта проблема относится к первоначальному этапу работы над проектом или выпускной квалификационной работы, формализованному пока слабо.

Первый этап – это обзор существующих аналогов, поиск прототипов, патентов, выбор физического принципа действия устройства. Второй этап проектирования – переход к математическому описанию выбранной структуры прототипа, а затем дальнейший синтез регулятора, обеспечивающего заданные требования по качеству регулирования.

Работа по проектированию при переходе от первого ко второму этапу может быть сформулирована как задача численной оценки структурных схем аналогов и сравнения вариантов физического принципа действия устройства. Кроме того, на этом этапе может решаться и изобретательская задача поиска нового физического принципа действия, новой структуры с целью получения патентоспособного решения.

Для численной оценки структурных моделей устройство представляется в виде информационно-энергетической схемы (ИЭС). ИЭС являются моделями потоков прохождения энергии/информации от входа до выхода системы и представляют собой ориентированные графы. Вершинами графа являются элементы структуры, а на ребрах указываются физические величины, в которых измеряется передаваемая энергия/информация [1]. Получение численной оценки ИЭС основано на том, что известны размерности физических величин на входах и выходах блоков схемы. Размерности позволяют перейти к имитационному размерному моделированию ИЭС [2] и по результатам моделирования сравнивать различные варианты структуры.

Теория размерности широко применяется в задачах проектирования технических систем, в том числе, и для разработки новых физических принципов действия в изобретательских задачах [3–5]. Однако в этих работах моделируются графы физических эффектов, имеющих обычно один вход и выход, в то время как блоки ИЭС могут иметь большое число входов и выходов, что приводит к дополнительным сложностям точного расчета численной оценки структуры.

Размерные модели ИЭС в LT-базисе

Простейшая типовая ИЭС замкнутой системы регулирования показана на рис. 1.

Граф схемы имеет три элемента: привод, объект регулирования и блок осбратной связи. Физические величины на входах и выходах блоков названы. Например, $x_{зад}$ – заданное входное перемещение, измеряемое в системе СИ в метрах; F – сила, поступающая из привода на объект регилулирования и измеряемая в ньютонах; x – выходное перемещение объекта регулирования, измеряемое в метрах и подаваемое на блок обратной связи; $x_{ос}$ – выход блока обратной связи в виде перемещения, также измеряемого в метрах. В общем случае на входах и выходах могут быть и другие физические величины, например, $x_{зад}$ и $x_{ос}$ могут представлять собой электрическое напряжение измеряемое в вольтах. Назначение конкретных физических величин дает информацию о внутренней конструкции блока. Если у блока обратной связи на входе и выходе линейное перемещение, то он может быть реализован в виде механического рычага; если на выходе электрическое напряжение то блоком обратной связи должен быть преобразователь механической величины в электрическую, например, индуктивный датчик. Схема с размерностями снижает уровень абстрактности модели и вносит дополнительную информацию, которая и дает разную численную оценку ИЭС для разных случаев реализации элементов схемы.

Для размерного моделирования запишем размерности входов и выходов всех блоков, например, для какого-то j-го блока размерность $[x]_j$ входа x_j можно записать в виде:

$$\left[x\right]_j = \left[A_1^{b_{1,j}} \quad A_2^{b_{2,j}} \quad \ldots \quad A_i^{b_{i,j}} \quad A_{i+1}^{b_{i+1,j}} \quad \ldots \quad A_k^{b_{k,j}} \right],$$

а размерность $[y]_j$ выхода y_j можно записать в виде:

$$\left[y\right]_j = \left[A_1^{c_{1,j}} \quad A_2^{c_{2,j}} \quad \ldots \quad A_i^{c_{i,j}} \quad A_{i+1}^{b_{i+1,j}} \quad \ldots \quad A_k^{c_{i,j}} \right]$$

где A_i – основные единицы выбранной системы измерений, i=1, ..., k, $b_{i,j}$ и $c_{i,j}$ – показатели степени.

Тогда можно записать матрицы входа $\mathbf{X}_j$ и выхода $\mathbf{Y}_j$ j-го блока:

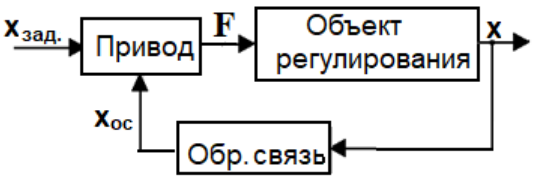


Рис. 1. Простейшая ИЭС замкнутой системы регулирования

$$x_j = \begin{bmatrix} A_1^{c_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & A_k^{c_k} \end{bmatrix} \quad y_j = \begin{bmatrix} A_1^{b_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & A_k^{b_k} \end{bmatrix}$$

и передаточную матрицу блока

$$W_j = Y_j (X_j)^{-1} =$$

$$= \begin{bmatrix} A_1^{c_1-b_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & A_k^{c_k-b_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^{d_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & A_k^{d_k} \end{bmatrix}.$$

Таким образом, вся численная информация о блоке заключена в показателях степени при основаниях на главной диагонали. В случае нескольких входов и выходов блока передаточные матрицы вычисляются от каждого входа к каждому выходу аналогично.

Международная система единиц СИ в размерном моделировании пока не используется, очевидно, в силу ее громозкости. Чаще используется система измерений с тремя основными величинами MLT (масса, длина, время) [5] или с двумя LT (длина, время), известная как система кинематических величин Р. Бартини [7]. Систему Бартини или LT-базис применяют как для решения изобретательских задач, так и задач проектирования. В работе [8] сделана попытка установить связь между матрицей разрешения технических противоречий и таблицей ктнематических величин Бартини. В работе [9] рассматривается метод синтеза на LT-плоскости графа, задающего физический принцип действия контрольно-измерительных приборов. В работе [10] LT-базис совместно с регрессионным анализом

D	L^{-1}	L^0	L^1	L^2	L^3	L^4	L^5
T^{-5}	$L^{-1}T^{-5}$	L^0T^{-5}	L^1T^{-5}	L^2T^{-5}	Поверхн. мощность	L^4T^{-5}	Мощность
T^{-4}	$L^{-1}T^{-4}$	L^0T^{-4}	Удельный вес Градиент давления	Давление Напряжение	Поверхн. натяжение Жесткость	Сила	Энергия Статистич. температура Момент
T^{-3}	$L^{-1}T^{-3}$	L^0T^{-3}	Плотность потока	Напряженность эл.-магн. поля Вязкость	Ток Массовый расход	Импульс	L^5T^{-3}
T^{-2}	Изменение электр. объемной плотности	Угловое ускорение Массовая плотность	Линейное ускорение	Разность потенциалов	Масса Кол-во электричества	Магнитный момент	Момент инерции
T^{-1}	Электр. объемная плотность	Частота Угловая скорость	Линейная скорость	Обильность двумерная	Расход объемный	Скорость смещения объема	L^5T^{-1}
T^0	Кривизна Изменение проводимости	Безразмерная величина Константа	Длина Емкость Самоиндукция	Поверхность (площадь)	Объем	Момент инерции плоской фигуры	L^5T^0
T^1	Проводимость	Период Продолжительность	Длительность расстояния	L^2T^1	L^3T^1	L^4T^1	L^5T^1
T^2	$L^{-1}T^2$	Поверхность времени	L^1T^2	L^2T^2	L^3T^2	L^4T^2	L^5T^2

Рис. 2. Система кинематических величин Бартини

применяется для построения кривой развития технической системы. Численная оценка степени новизны устройства в LT-системе предлагается в [11]. Обычно система кинематическиз величин Бартини задается в виде таблицы (рис. 2).

Наименования физических величин размещаются в клетках таблицы, а степени L^m и T^n приводятся в заголовках таблицы по горизонтали и вертикали соответственно. Так имеется всего две основных единицы, то все матрицы имеют размер 2×2:

$$W = yx^{-1} = \begin{bmatrix} L^{m2} & 0 \\ 0 & T^{n2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L^{-m1} & 0 \\ 0 & T^{-n1} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} L^{m2-m1} & 0 \\ 0 & T^{n2-n1} \end{bmatrix}.$$

Размерности физических величин могут использоваться для их кодирования, сравнения и распознавания свойств. Например, линейная скорость имеет размерность L^1T^{-1}, а сила L^4T^{-4}, тогда можно утверждать, что скорость отличается от силы тем, что имеет один ген длины и один ген времени, а сила – четыре гена длины и четыре гена времени. Понятия генов длины L^1 и времени T^{-1} впервые были введены в [11]. Они используются в математических моделях процессов передачи наследственной информации между поколениями техники.

Любая клетка таблицы Бартини задает закон сохранения. Суть в том, что размерность L^mT^n = const задает инвариант, общее свойство физики, которое имеют все объекты, входящие в эту физику. Например, для физики твердых тел константой является постоянство расстояний между двумя точками тела L=Const, не меняющееся при любом преобразовании координат, в любой геометрии. Это клетка в системе Бартини – L^1T^0. То же самое для несжимаемых жидкостей – инвариантом является постоянство объема V=const, клетка L^3T^0. Для газов данной массы – это развитие закона Бойля – Мариотта PV=Θ, где Θ – статистическая температура, а клетка $L^2T^{-4}.L^3T^0 = L^5T^{-4}$ – в виде закона сохранения энергии. Эти положения имеют большое значение в изобретательской физике для математического задания и распознавания агрегатных состояний вещества – твердого тела, жидкости и газа.

Рассмотрим пример размерного моделирования замкнутой автоматической системы, а именно – датчика давления [13], конструкция которого и ИЭС показаны на рис. 3.

Датчик измеряемого давления Р имеет корпус *1*, внутри которого жестко закреплена мем-

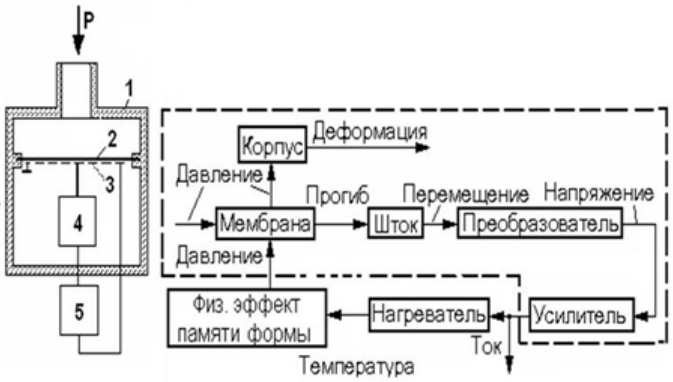


Рис. 3. Датчик давления (слева – конструкция; справа – ИЭС)

брана *2*, прогиб которой механически действует на шток индуктивного преобразователя *4*. Электрическое напряжение с преобразователя усиливается усилителем *5*, ток с которого подается на пленочный нагреватель *3*, расположенный под мембраной *3*. Мембрана выполнена из материала с эффектом памяти формы, который при нагреве заставляет мембрану прогибаться против измеряемого давления, тем самым включая отрицательную обратную связь в датчике. Она и была защищена в этом изобретении, а прототип на ИЭС обведен штриховой линией. Выход усилителя несет информацию об измеряемом давлении. ИЭС составлена на основе описания принципа действия и конструкции.

Далее рассчитываются переходные матрицы всех блоков схемы. Например, для мембраны:

$$W = \frac{d}{\Delta P} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^4 \end{bmatrix}.$$

Аналогично, по входным и выходным физическим величинам и их размерностям в таблице Бартини рассчитываются все остальные матрицы. Схема размерного моделирования датчика приведена на рис. 4 (без учета действия мембраны на корпус устройства).

Проверкой правильности составления схемы является равенство произведения всех последовательно соединенных матриц замкнутого контура единичной матрице, т. е.

$$W_i = \begin{bmatrix} L^0 & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где i=1, 2, …, – номер матрицы в замкнутом контуре схемы моделирования.

Для численной оценки размерных схем будем использовать понятие ресурсоемкости [14] блока схемы $R_{i,}$ которую будем определять как евклидову норму от передаточной матрицы W_i:

$$R_i = \sqrt{m^2 + n^2},$$

где $W_i = \begin{bmatrix} L^m & 0 \\ 0 & T^n \end{bmatrix}$, а m и n определяют количество генов пространства и времени, необходимых для преобразования входной величины i-го блока в выходную величину. Ресурсоемкость всей схемы определяется суммой ресурсоемкости всех блоков

Рис. 4. Схема размерного моделирования замкнутой системы датчика

$$R = \Sigma R_i = \sqrt{17} + \sqrt{5} + \sqrt{2} + \sqrt{5} + 3 = 13{,}009,$$

здесь ресурсоемкость блоков с нулевой матрицей нулевая. По ресурсоемкости можно сравнивать различные варианты устройства при его проектировании.

Особенности размерного моделирования многомерных блоков ИЭС

Многомерными называются блоки, имеющие несколько входов и выходов, причем в частном случае, на некоторых входах и выходах могут быть одни и те же физические величины. Отметим некоторые особенности моделирования многомерных блоков.

1. Сумматоры для замыкания обратных связей моделируются нулевыми матрицами, поскольку на входах и выходах у них могут быть величины только одной физической природы, причем знак величины не учитывается.

2. Обычно многомерные блоки содержат несколько передаточных матриц, которые должны быть соединены стрелками так, чтобы можно было попасть из любого входа на любой выход.

3. Блоки должны иметь минимальную ресурсоемкость, т. е. не должно быть избыточности генов длины и времени.

Пример моделирования блока с двумя выходами приведен на рис. 5.

Входом является давление, а выходами также является давление и электрический ток. Для сквозного пропуска давления служит верхняя нулевая матрица. Вторая, нижняя матрица преобразует давление в электрический ток. Схема размерного моделирования блока с двумя входам и выходом показана на рис. 6.

Входами являются электрический ток и смещение, выходом давление. Представлены две схемы моделирования, неправильная – в центре, и правильная – справа. Ошибки в неправильной схеме, следующие: имеется два выхода – по давлению вместо одного, матрицы внутри не связаны, присутствует избыточность в виде одного гена времени. Для устранения

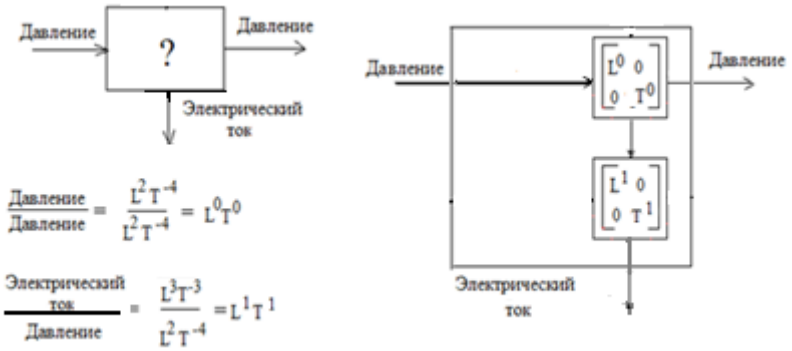


Рис. 5. Схема размерного моделирования блока с двумя выходами

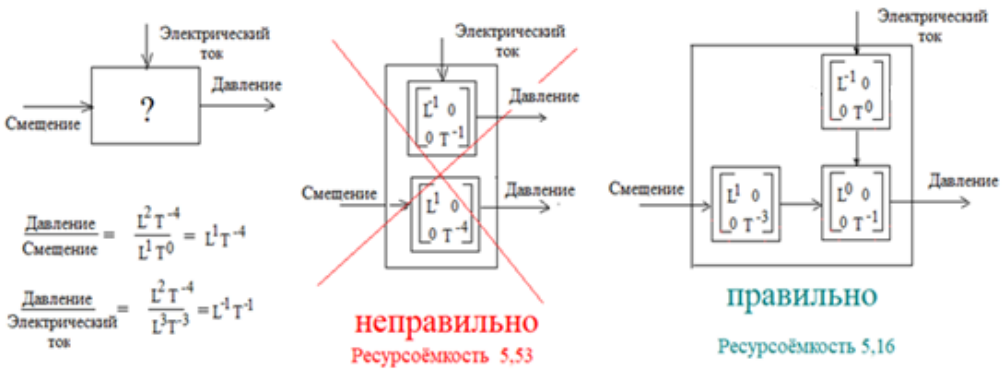


Рис. 6. Схема размерного моделирования блока с двумя входами

Рис. 7. Устранение избыточности в схеме размерного моделирования

избыточности нижняя матрица разбивается на произведение двух матриц. Тогда правильная схема моделирования будет содержать уже три матрицы, где правая нижняя матрица будет общей для двух ветвей прохождения входов на общий выход. Еще один пример устранения избыточности приведен на рис. 7. Здесь матрицы преобразовании (на рисунке слева) записаны, верно, однако блок обладает избыточностью как по генам длины, так и по генам времени. Правильный вариант представлен на рис. 7 справа.

Размерные модели дифференциальных уравнений систем автоматического регулирования в LT-базисе

При проектировании систем автоматического регулирования (САР) используются структурные схемы, полученные на основе дифференциальных уравнений, описывающих физику динамических процессов в блоках структуры. С одной стороны, они менее абстрактны, чем соответствующие ИЭС, так как содержат информацию обо всех коэффициентах дифференциальных уравнепнй. С другой стороны, ИЭС всегда строятся в базисе физических координат, а вструктурных схемах САР координатами состояния могут быть линейные комбинации физических координат. Однако, если структурная схема САР использует базис физических координат, то для нее можно построить ИЭС без учета численных значений коэффициентов и возможных нелинейностей в блоках структуры. Правда, такого рода ИЭС адекватно будут представлять только установившийся процесс в замкнутых устройчивых САР. Действительно, обратимся, например, к замкнутой ИЭС датчика давления (рис. 4). При постоянном входном давлении P в установившемся процессе все выходные величины блоков, такие как разность давлений ΔP, прогиб d, перемещение x, напряжение U, ток I, температура Θ, давление P, также будут постоянными, т. е. P = Const, ΔP = const, d = const и т. д. Размерности этих величин находятся в клетках таблицы Бартини, а каждая клетка с размерностью $L^m T^n$ = const задает инвариант, общее свойство физики, которое имеют все объекты, входящие в эту физику. Следовательно, общая сококупность равенств размерностей физических величин задает физику установившихся процессов в замкнутых устройчивых САР. В рамках этой физики можно решать некоторые специфические задачи, например, численный расчет ресурсоемкости, численный расчет структурной асимметрии системы нелинейных дифференциальных уравнений аттрактора Ресслера [15] и др.

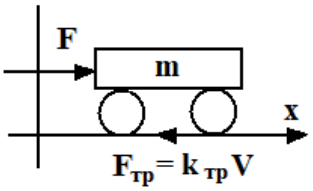


Рис. 8. Модель тележки транспортного робота

Рассмотрим простой пример размерного моделирования САР линейного перемещения тележки (рис. 8) транспортного робота.

Линейное перемещение $x(t)$ тележки описывается законом Ньютона:

$$\Sigma F_k = ma = F - F_{тр},$$

где m – масса тележки; a – линейное ускорение; F – толкающая сила; $F_{тр}$ – сила трения, пропорциональная линейной скорости V колес; $F_{тр} = k_{тр} V$ ($k_{тр}$ – коэффициент трения). Учитывая, что линейное ускорение является второй производной по времени от линейного перемещения, а линейная скорость – первой производной, составим схему простейшей САР для моделирования в MathCad (рис. 9).

Структурная схема составлена в базисе физических координат с единичной обратной свя-

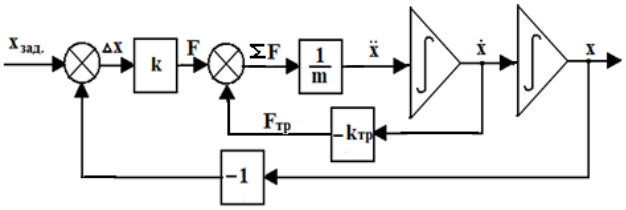


Рис. 9. Структурная схема САР перемещения тележки транспортного робота

зью по перемещению и пропорциональным регулятором с коэффициентом передачи k. Система обладает астатизмом первого порядка, поэтому установившаяся ошибка при постоянном входном сигнале равна нулю. Далее по таблице Бартини определяем размерности всех физических величин на входах и выходах блоков модели, находим передаточные матрицы и составляем размерную схему моделирования установившегося режима (рис. 10).

Обратим внимание, что инвариантом является равенство единичной матрице произведения передаточных матриц любого замкнутого контура. Общая ресурсоемкость схемы равна 14,848.

Анализ размерных моделей и локальный синтез новой структуры

После построения размерной модели решаются задачи анализа. Первое направление анализа – численная оценка ресурсоемкости R системы. Эффективность затрат ресурсов можно оценить по сравнению с прототипом. Например, затраты ресурсов замкнутого датчика $R_{зам}$=13,009, затраты ресурсов прототипа (без обратной связи через нагреватель и мембрану с памятью формы) R=7,773. Допустим, максимальный диапазон измеряемого давления для прототипа 0–30 МПа, для нового решения расширился до 0–70 МПа. Тогда эффективность затрат Э можно определить, поделив затраты на диапазон. Получаем $Э_{зам}$=13,009/70= =0,186 Мпа$^{-1}$ для замкнутого датчика, Э=7,773/30=0/259 Мпа$^{-1}$ для прототипа. Аналогично можно посчитать удельные затраты и от повышения точности измерений (снижения величины ошибки). Второе направление, пригодное для замкнутых систем, графическое, путем построения диаграммы затрат ресурсов в замкнутом контуре. Затраты ресурсов оцениваются площадью многоугольника, образованного

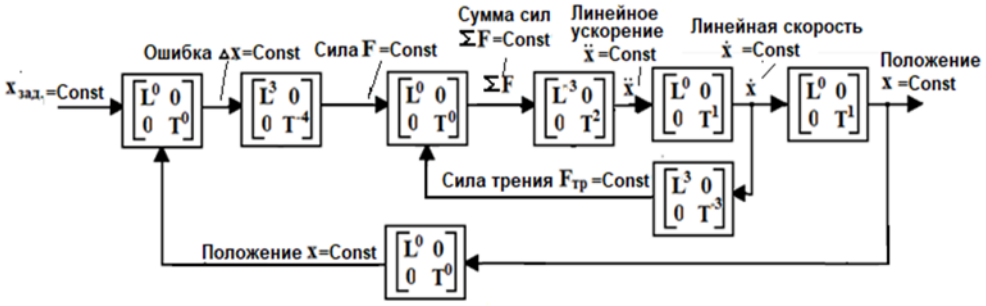


Рис. 10. Размерная схема моделирования САР тележки транспортного робота

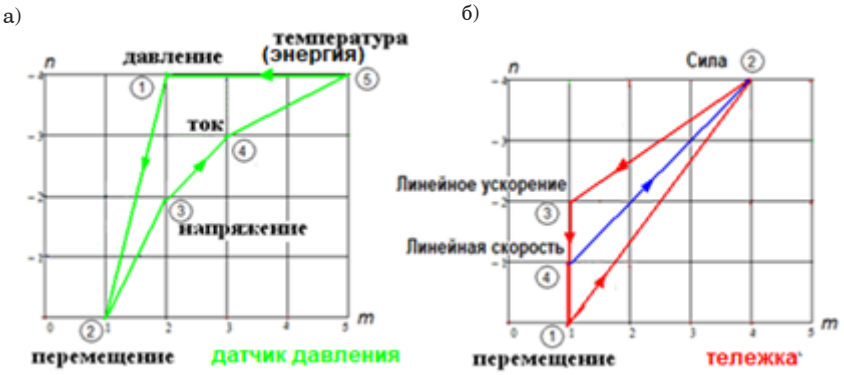


Рис. 11. Диаграммы мощности затрат ресурсов для датчика давления (а) и САР тележки робот (б)

векторами ребер графа размерной модели (рис. 11).

Диаграммы строятся в виде графа на плоскости с центром $m=n=0$, по осям абсцисс и ординат откладываются показатели степени m и n в размерностях физических величин. Вершины графа определяются по порядку их появления на входах и выходах блоков при обходе замкнутого контура. Например, для датчика давления в первой вершине давление имеет координаты 2, –4, что соответствует размерности давления в системе Бартини L^2T^{-4}. Вторая вершина – прогиб мембраны и она же перемещение штока имеет координаты 1,0. Вершины соединяются векторами ветвей, которые и образуют замкнутый многоугольник. Для датчика давления номера вершин 1, 2, 3, 4, 5, для тележки – 1, 2, 3 (внешний контур) и 2, 3, 4 (внутренний контур). Мощность затрат ресурсов определяется численно площадью многоугольников, чем она меньше, тем эффективнее решение. Термин «мощность» применен потому, что площадь измеряется в клетках системы координат, а площадь клетки есть произведение n на m. По аналогии с мощностью электрического тока, как произведения величины тока на напряжение, рассматривается и мощность затрат пространственных и временных ресурсов.

Задачу синтеза (рис. 12) будем решать с целью снизить затраты ресурсов LT, т. е. уменьшить площадь многоугольника путем включения в контур физических эффектов, реализующих операцию интегрирования по времени. Обратим внимание, что любое движение по столбцам таблицы Бартини сверху вниз означает операцию интегрирования по времени. Включение интеграторов повышает порядок астатизма. Поэтому отсекаем заштрихованную часть многогранника датчика давления по вертикали, проводя вектор из давления (точка *1*) в напряжение (точка *3*).

Рис. 12. Графический синтез датчика давления с пьезокерамической шайбой

Далее проверяем, есть ли такой физический эффект преобразования давления в электрическое напряжение. Такой эффект есть, это прямой пьезоэлектрический эффект. Конструктивно для его реализации заменяем мембрану пьезокерамической шайбой. С физической точки зрения пьезокристалл, как и пьезокерамическая шайба, в схемах электрического моделирования заменяется электрической емкостью, которая обладает свойством накопления, интегрирования.

Обратим внимание, что промежуточной точкой между давлением и напряжением, у Бартини является напряженность электромагнитного поля H. Есть и эффект преобразования давления в напряженность электромагнитного поля, называемый пьезомагнитным, которым обладают некоторые ферримагнетики. Его тоже можно использовать для возможных новых решений.

Далее контур замыкается через подходящие физические эффекты, что определяется необходимостью получения минимальной площади затрат ресурсов и особенностями конструктивной реализации. В частности, на рис. 12 показано замыкание контура через силу, исключая нагрев. Эта сила должна подпирать керамическую шайбу снизу.

Выводы

1. Этап размерного моделирования необходимо вставить в перечень этапов проектирования технических устройств после первого этапа обзора существующих решений, с целью численной оценки для выбора вариантов структур.

2. Развивать направление научных исследований в области физики установившихся процессов в САР с целью выявление связи размерностей физических величин с переменными состояния математических моделей.

3. Метод можно применять к моделированию некоторых нелинейных операций над переменными.

Список источников

1. *Половинкин А. И.* Основы инженерного творчества. СПб.: Лань, 2022. 364 с.

2. Structural simulation of devices based on patent descriptions / A. Bushuev [et al.] // International journal of systematic innovation. 2023. Vol. 7, № 5. P. 1–9.

4. *Litvinov Y. V., Bushuev A., Nuyya O. V.* Simulation of graphs of physical effects for information and energy circuits // Journal of physics: conference series. 2022. Vol. 2373. P. 092003.

5. *Mokammelb F., Riitahuhtab A.* Systematic search and ranking of physical contradictions using graph theory principles // World conference: TRIZ FUTURE, TF 2011-2014. Procedia Engineering 131. 2015. P. 1165–1182.

6. Knowledge bases of physical effects and phenomena for method of energy-informational models by means of ontologies / V. Zaripova, I. Petrova, A. Kravets, O. Evdoshenko // Creativity in intelligent technologies and data Science». First conference, CIT&DS (Volgograd, Russia). 2015. P. 224–237.

7. *Bartini R. O.* Relations between physical constants // Progress in physics. 2005. Vol. 3. P. 34–40.

8. *Rajic D.* Compatibility between TRIZ contradiction matrix and LT-Units system // FME transaction. 2020. Doi: 10.5937/fme2002460R.

9. *Litvinov Y. V., Bushuev A. B., Litvinov E. Y.* Graphic synthesis of the operating physical principle of control and measuring devices // Wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECONF – 2021). 2021. P. 9470754. Doi: https://doi.org/10.1109/WECONF51603.2021.9470754.

10. Evaluation of design innovation using the length-time dimension and regression analysis / K. Wang, R. Tan, Q. Peng, L. Zhang // Journal of mechanical science and technology. 2022. Vol. 36, № 11. P. 5625–5637.

11. Численная оценка новизны устройства по формуле изобретения / А. Б. Бушуев, Н. А. Дударенко, Ю. В. Литвинов, О. К. Мансурова // Известия высш. учеб. завед. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 12. С. 902–915.

12. *Bushuev A. B.* Physico-mathematical resources search // The TRIZ journal. 2008. URL: https://the-trizjournal.com/physico-mathematical-search-of-resources/ (дата обращения: 10.11.2023).

13. А. с. СССР № 1472773. Датчик давления / А. С. Блайвас, Н. В. Филиппова, А. П. Штыков. 24.08.1987.

14. *Бушуев А. Б.* Численная оценка информационно-энергетических схем измерительных устройств // Измерительная техника. 2017. № 9. С. 3–7.

15. Биологическая модель поиска решения изобретательской задачи / А. Б. Бушуев [и др.] // Известия вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 9. С. 851–859.

УДК 681.51 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-155-157**

Е. Ю. Ватаева*
старший преподаватель
Н. Л. Гречкин*
старший преподаватель
С. С. Тимофеев*
старший преподаватель
В. Ф. Шишлаков*
доктор технических наук, профессор
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ MP238

Рассматривается принцип работы регулятора мощности MP238. Приводятся результаты полиномиальной аппроксимации статической характеристики исследуемого регулятора при различных показателях степеней.
Ключевые слова: *регулятор мощности, нелинейные системы автоматического управления, полиномиальная аппроксимация.*

E. Yu. Vataeva*
Senior Lecturer
N. L. Grechkin*
Senior Lecturer
S. S. Timofeev*
Senior Lecturer
V. F. Shishlakov*
Dr. Sc., Tech., Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE RESEARCH OF POWER REGULATOR MP238

The article discusses the operating principle of the MP238 power regulator. The results of polynomial approximation of the static characteristics of the controller under study are presented for various exponents.
Keywords: *power controller, nonlinear automatic control systems, polynomial approximation.*

Функциональные возможности регулятора мощности MP248 (рис. 1) подразумевают управление нагрузкой до 8000 Вт в цепях переменного тока с напряжением 220 В. Он может быть использован совместно с микроконтроллером, платой Arduino и быть самостоятельным устройством [1]. Если применять его вместе с микроконтроллером, то он будет выступать в качестве силового блока управления нагрузкой, получая сигнал широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с вывода микроконтроллера (МК). Соединяя ШИМ-выход микроконтроллера с регулятором мощности, возможно программно управлять различными объектами – электродвигателями, вентиляторами, нагревательными элементами, лампами накаливания и т. п. Данный регулятор мощности входит в состав блока «Модуль регулирования» (рис. 2), который был разработан на кафедре управления в технических системах для учебно-лабораторного комплекса «Исследование двигателя по-

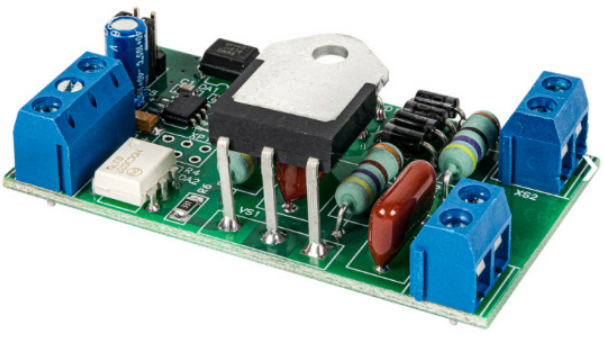


Рис. 1. Регулятор мощности MP238

Рис. 2. Блок «Модуль регулирования»

стоянного тока независимого возбуждения». «Модуль регулирования» осуществляет поддержание заданной скорости вращения двигателя.

MP248, со стороны контактов управления, требует питания 5 В. Модуль оснащен режимом детектора перехода сетевого напряжения через ноль [2]. Плюсом этого является то, что при управлении асинхронным двигателем снижается нагрев его обмоток, а также снижаются помехи в линии питания 220 В. Технические характеристики приведены в табл. 1. На рис. 3 показана статическая характеристика исследуемого регулятора мощности.

Поскольку статическая характеристика регулятора мощности является нелинейной, для использования ее в модели необходима аппроксимация. Наиболее распространенной является

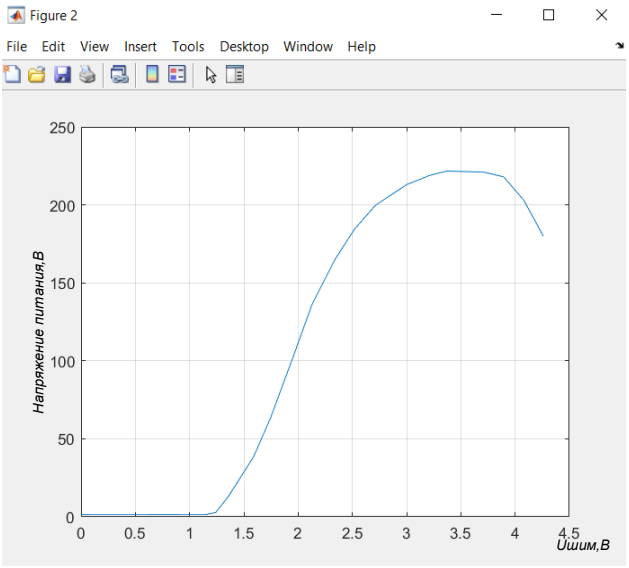


Рис. 3. Статическая характеристика регулятора мощности MP248

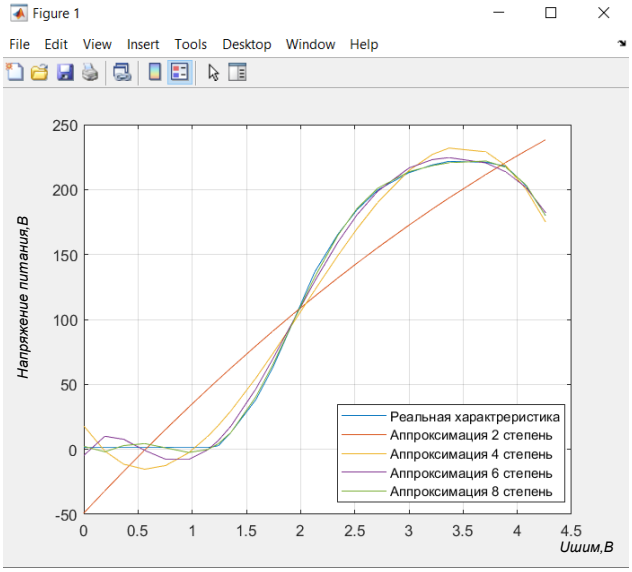


Рис. 4. Аппроксимация статической характеристики

Таблица 1

Технические характеристики регулятора мощности MP248

Показатель	Значение
Напряжение нагрузки, В	220
Тип нагрузки	Переменный ток
Максимальная мощность, Вт	8000
Максимальная величина управляющего сигнала, В	5
Напряжение питания управляющей части, В	3,3–5
Длина, мм	35
Ширина, мм	25
Высота, мм	25

Таблица 2

Коэффициенты аппроксимирующего полинома

Коэффициент полинома	Показатель степени полинома			
	2	4	6	8
A	–	–	–	1,09
B	–	–	–	–20,51
C	–	–	–2,37	154,49
D	–	–	34,60	–594,50
E	–	0,2657	–190,55	$1{,}21 \cdot 10^3$
F	–	–22,08	470,79	$-1{,}26 \cdot 10^3$
G	–5,10	126,97	–464,49	598,83
H	89,18	–123,73	149,69	–98,18
M	–49,04	18,01	–4,65	2,29

полиномиальная аппроксимация [3]. Аппроксимирующий полином записывается в виде:

$$y(x) = Ax^8 + Bx^7 + Cx^6 + Dx^5 + \\ + Ex^4 + Fx^3 + Gx^2 + Hx + M.$$

На рис. 3 приведена полиномиальная аппроксимация статической характеристики регулятора для разных степеней аппроксимирующего полинома; в табл. 2 представлены коэффициенты для каждого показателя степени.

Таким образом, для моделирования замкнутой нелинейной системы по скорости возможно использовать аппроксимирующий полином восьмой степени, который показал наилучшее приближение к реальной статической характеристике. Полученные результаты также возможно использовать при решении задачи параметрического синтеза САУ, в состав которой входит данный регулятор мощности.

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».

Список источников

1. MP248 – регулятор мощности для Arduino 8 кВт, 220В (40А). URL: https:// masterkit.ru (дата обращения: 05.12.2023).

2. *Епифанов А. П.* Основы электропривода: учеб. пособие для СПО. СПб.: Лань, 2024. 192 с.

3. Полиномиальная и аналитическая аппроксимации при решении задачи синтеза нелинейных САУ / Е. Ю. Ватаева, В. Ф. Шишлаков, Н. Л. Гречкин, Н. В. Решетникова // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: сб. тез. докладов II Междунар. форума. СПб., 2022. С. 164–167.

УДК 681.51 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-158-160**

Е. Ю. Ватаева*
старший преподаватель
Н. Л. Гречкин*
старший преподаватель
Д. В. Шишлаков*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ИМПУЛЬСНОЙ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ

Рассматривается решение инженерно-технической задачи, связанной с синтезом нелинейной импульсной следящей системы. Для поставленной задачи используется обобщенный метод Галеркина с применением полиномиальной аппроксимации. Приводятся результаты синтеза.
Ключевые слова: *импульсные системы, нелинейные системы автоматического управления, полиномиальная аппроксимация, обобщенный метод Галеркина.*

E. Yu. Vataeva*
Senior Lecturer
N. L. Grechkin*
Senior Lecturer
D. V. Shishlakov*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

PARAMETRIC SYNTHESIS OF IMPULSE POTENTIOMETRIC TRACKING SYSTEM

The work discusses the solution of an engineering and technical problem associated with the synthesis of a nonlinear pulse tracking system. For this task, the generalized Galerkin method using polynomial approximation is used. The results of the synthesis are given.
Keywords: *impulse systems, nonlinear automatic control systems, polynomial approximation, generalized Galerikn method.*

В области автоматического управления существует широкий спектр методов, предназначенных для анализа и создания линейных импульсных систем автоматического управления (САУ). Однако при решении практических задач довольно часто возникает необходимость включать импульсные элементы в контур управления нелинейных САУ, что значительно усложняет процесс создания такой системы [1–3]. В данной области отсутствуют универсальные математические и алгоритмические подходы. Для решения этой проблемы предлагается использовать обращение прямого вариационного метода анализа, известного как обобщенный метод Галеркина. Важно отметить, что выбор метода аппроксимации нелинейного элемента тесно связан с разработкой законов управления, в данной работе предлагается использовать полиномиальную аппроксимацию, аппроксимирующий полином которой записывается в виде:

$$y(x) = y(x_0) + a_1(x - x_0) + \\ + a_2(x - x_0)^2 + \ldots + a_n(x - x_0)^n.$$

Объектом исследования является потенциометрическая маломощная нелинейная следящая система с импульсным элементом (рис. 1; 2) [4].

Корректирующее устройство имеет следующую передаточную функцию:

$$W_{ку} = k\frac{(T_1 s + 1)(T_3 s + 1)(T_5 s + 1)}{(T_2 s + 1)(T_4 s + 1)(T_6 s + 1)}.$$

Необходимо определить значение неизвестных варьируемых параметров

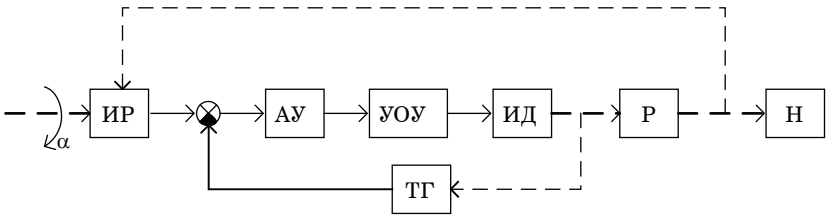


Рис. 1. Функциональная схема объекта исследования: ИР – измеритель рассогласования; АУ – аналоговый умножитель; УОУ – усилитель обмотки управления; ИД – исполнительный двигатель; Р – редуктор; Н – нагрузка; ТГ – тахогенератор

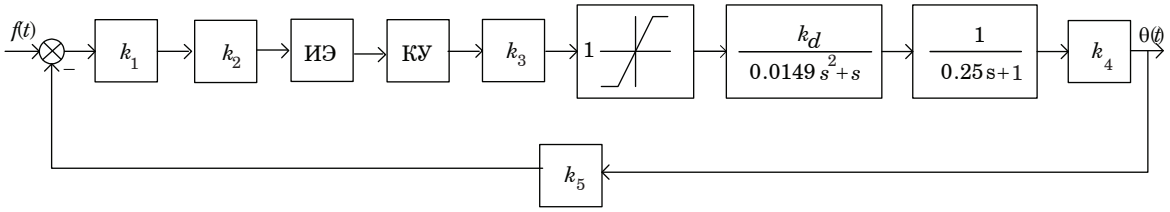


Рис. 2. Структурная схема рассматриваемой системы: k_1 – ИР; k_2 – АУ; КУ – корректирующее устройство ; k_3 – УОУ; k_4 – коэффициент передачи редуктор; k_5 – коэффициент пересчета угла (из радиан в градусы); $\frac{k_d}{(0{,}0149s^2+s)(0{,}25s+1)}$ – передаточная функция двухфазного асинхронного двигателя; идеальный импульсный элемент

$T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$, которые обеспечивают в системе заданные показатели качества T_{nn} – 3 с, перерегулирование σ не более 10 %. Коэффициент k примем равным 1 для упрощения решения задачи.

Подробно алгоритм решения задачи синтеза с использованием обобщенного метода Галеркина рассмотрено в [5], здесь лишь остановимся на основных этапах.

1. Ограничение на варьируемые параметры, очевидно, $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$;

2. Определение желаемого программного движение (рис. 3):

$$x^0(t) = 48{,}21e^{-2{,}67t}\cos(2{,}13t - 0{,}89).$$

3. Формирование невязки:

$$\Psi = x_0(t)[(0{,}0149s^2 + s)(0.25s + 1)\times$$
$$\times(T_2s + 1)(T_4s + 1)(T_6s + 1)] + F[x_0^*(t)]\times$$
$$\times[k_dk_1k_2k_3k_4k_5k(T_1s + 1)(T_3s + 1)(T_5s + 1)] -$$
$$-f(t)[k_1k_2k_3k(T_1s + 1)(T_3s + 1)(T_5s + 1)\times$$
$$\times(0{,}0149s^2 + s)(0{,}25s + 1)].$$

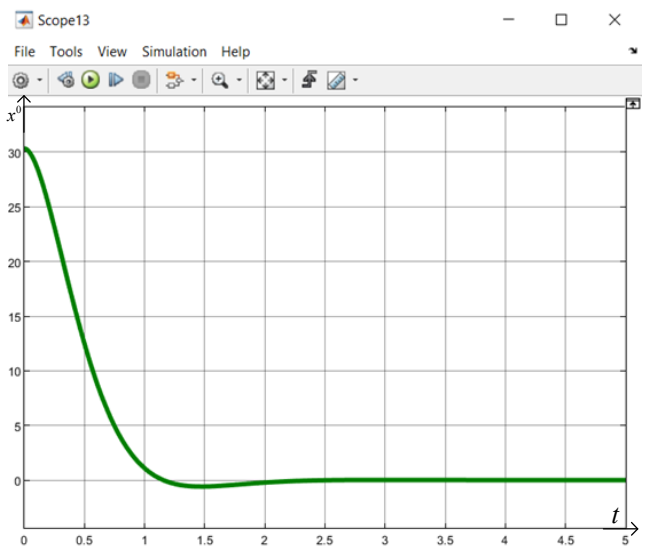


Рис. 3. Желаемое программное движение

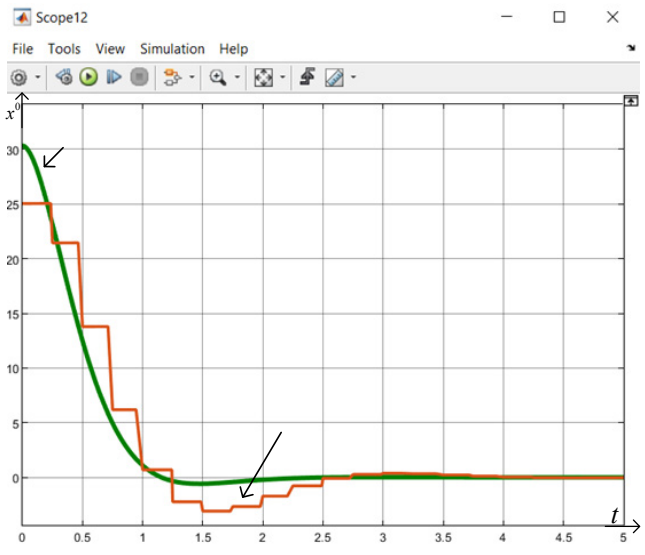


Рис. 4. Результаты синтеза

4. Определение искомых параметров. В результате решения были получены следующие параметры: $T_1 = 21{,}85$, $T_2 = 18{,}7$, $T_3 = 30{,}9$, $T_4 = 39{,}85$, $T_5 = 28$, $T_6 = 29{,}9$, что удовлетворяет заданным показателям качества (рис. 4).

В работе продемонстрировано решение реальной инженерно-технической задачи, связанной с синтезом маломощной потенциометрической нелинейной следящей системы. В результате были коэффициенты корректирующего устройства: $T_1 = 21{,}85, T_2 = 18{,}7, T_3 = 30{,}9$, $T_4 = 39{,}85, T_5 = 28, T_6 = 29{,}9$, обеспечивающие заданные показатели качества синтезируемой системы.

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».

Список источников

1. New trends in nonlinear control systems and applications / L. Zhitao [et al.] // Abstract and applied analysis. 2015. № 1-2. Doi: 10.1155/2015/637632.

2. Nonlinear control systems – a brief overview of historical and recent advances / I. Jamshed [et al.] // Nonlinear engineering. 2017. № 6. Doi: 10.1515/nleng-2016-0077.

3. Non-linear control model for use in greenhouse climate control systems / J. Moghaddam, G. H. Zarei, D. Momeni. H. Faridi // Res. agr. eng. 2022. № 68. P. 9–17.

4. *Акопов В. С. , Полякова Т. Г., Тимофеев С. С.* Исследование и синтез потенциометрической маломощной следящей системы: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2021. 59 с.

5. Синтез параметров законов управления нелинейных САУ при полиномиальной аппроксимации / В. Ф. Шишлаков, Д. В. Шишлаков, Е. Ю. Ватаева, Н. В. Решетникова // Завалишинские чтения – 18: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2018. С. 114–118.

УДК 004.021 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-161-166**

Д. А. Зырянов*
студент
С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
Е. М. Бадика*
студент
А. П. Бобрышов*
аспирант, ассистент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ADRRT*-CONNECT И A* ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИ ПЕРЕПЛАНИРУЕМЫХ МАРШРУТОВ НА ПРОИЗВОЛЬНОЙ МЕСТНОСТИ

Рассматриваются модифицированные алгоритмы построения, анализа и динамической перестройки маршрутов для меняющейся произвольной местности, производственного помещения. Исследуются принципы работы алгоритмов, варианты модификаций и улучшений. Приведены анализ достоинств и недостатков алгоритмов и примеры работы алгоритмов по планированию маршрутов и их динамическому перестроению.
Ключевые слова: *автоматизация, алгоритм, маршрут, карта, перепланируемые маршруты, роботы, мобильные роботы.*

D. A. Zyryanov*
Student
S. V. Solyonyj*
PhD, Tech., Associate Professor
E. M. Badika*
Student
A. P. Bobryshov*
PhD Student, Assistant
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ANALYSIS OF ADRRT*-CONNECT AND A* ALGORITHMS FOR DYNAMICALLY RESCHEDULED ROUTES IN ARBITRARY TERRAIN

This article discusses modified algorithms for constructing, analyzing and dynamically rearranging routes for changing arbitrary terrain, industrial premises. The principles of operation of these algorithms, options for modifications and improvements are considered. An analysis of the advantages and disadvantages of the algorithms is presented. The article provides examples of algorithms for route planning and their dynamic realignment.
Keywords: *automation, algorithm, route, map, rescheduled routes, robots, mobile robots.*

Задача построения оптимальных маршрутов движения актуальна для различных областей: транспортных перевозок, движения мобильных роботов, планирования движения пешеходов, работы навигационных систем. Для всех этих примеров необходимо, чтобы итоговые маршруты строились наиболее оптимально и быстро.

Другая проблема – использование произвольной карты, без привязки к существующим графам. Многие транспортные, навигационные системы используют алгоритмы графов для анализа маршрутов. Данные алгоритмы подразумевают заранее подготовленные структуры. Однако при построении маршрутов на новой местности, либо в постоянно меняющихся условиях данные графы невозможно построить заранее.

Рассмотрим варианты решения данной задачи, основанные на двух алгоритмах – ADRRT*-Connect и A*. При этом необходимо учитывать следующие критерии работоспособности:

– скорость просчета;

– стабильность и повторяемость просчета.

Скорость просчета будет непосредственно влиять на работу всей управляющей системы, а также на время принятия решений. Стабильность необходима для решения задач построения маршрутов в производственных помещениях, где случайные траектории могут нарушать функционирование других роботов и людей. Стабильность также определяет гарантию построения хотя бы одного итогового маршрута.

Упрощения: при анализе алгоритмов опустим процесс построения бинарной карты. Данная карта формируется по следующим правилам:

1) черные области – области, в которых невозможно движение;

2) белые области – области, в которых может двигаться объект. При этом данные области строятся с запасом, чтобы при движении по границе с черной областью объект полностью помещался по габаритам в разрешенную для перемещения область.

Проверка того, может ли объект переместиться из точки А в точку Б, осуществляется с помощью проверки луча. Строится луч из точки А в точку Б, и проверяются все точки в некоторой области луча (обусловленной округлением в меньшую и большую сторону координат реального луча). Если все точки на пути попадают в белую область, то объект может переместиться.

Для работы алгоритма A* разобьем все изображение на сетку с размерами, пропорциональными размерам разрешенных зон, при этом будем использовать вершины сетки, как вершины графа. Для более сложных карт можно применять меньший шаг сетки или применять адаптивно меняющуюся сетку, которая будет подстраиваться под разрешенные области. Для построения маршрута по графу начальная и конечная точки соединяются с ближайшей к ним точке графа.

Для работы алгоритма будем хранить два массива данных: рассчитанные точки, недопустимые или проверенные точки. В начале работы программы начальная точка маршрута добавляется в массив рассчитанных точек.

Каждая точка хранит в себе следующую информацию:

– координаты;

– родительская точка;

– цена движения (наименьший путь от начальной точки к данной);

– цена цели (абстрактное расстояние до целевой точки).

Алгоритм:

1) выбирается точка с наименьшей ценой цели в массиве рассчитанных точек. Данная точка переносится в массив рассчитанных точек;

2) анализируются все точки вокруг выбранной:

2.1) если точки нет в списке рассчитанных и проверенных, то проверяется, можно ли в нее попасть. Рассчитываются ее цены и указывается родитель в виде выбранной ранее точки. После чего соответственно она попадает в список рассчитанных или недопустимых;

2.2) если точка есть в списке проверенных, она игнорируется;

2.3) если точка есть в списке рассчитанных, проверяется цена движения, если она меньше, то цена и родитель изменяются;

3) повторение пунктов 1, 2 до момента достижения целевой точки.

При этом точкой выхода из алгоритма (в случае невозможности построения маршрута) является момент, когда в списке рассчитанных больше нет точек.

Для динамического перестраивания маршрутов применяются две методики:

1) методика полного перепланирования – подразумевает полное перестроение маршрута;

2) методика поиска разрывов – подразумевает локальный поиск маршрута в точках разрыва. Данная методика работает быстрее предыдущей, однако итоговые маршруты могут «огибать» препятствие не самым оптимальным путем.

Пример работы алгоритма приведен на рис. 1; 2.

Преимущества работы алгоритма A* для сложной местности:

– стабильность и повторяемость работы алгоритма;

– высокая скорость просчета;

– простая модификация алгоритма для учета сложности проходимости по графу (разный тип дорог – грунтовые, асфальт, песок).

Недостатки:

– потеря информации о потенциальных путях из-за привязанности к алгоритму создания сетки (графа);

– отсутствие учета исторической информации (ранее рассчитанной и полученной) для перестроения маршрутов или построения новых;

– малая плавность получившихся маршрутов.

Для решения проблемы плавности маршрутов для упрощения управления мобильным роботом необходимо внедрение алгоритмов сглаживания.

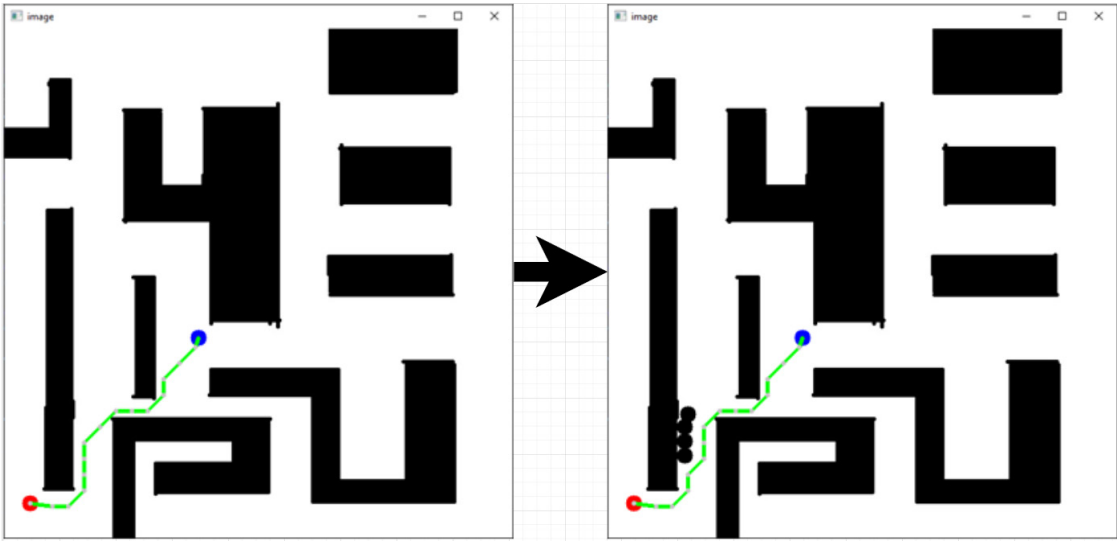


Рис. 1. Построение маршрута A и динамическое перестроение*

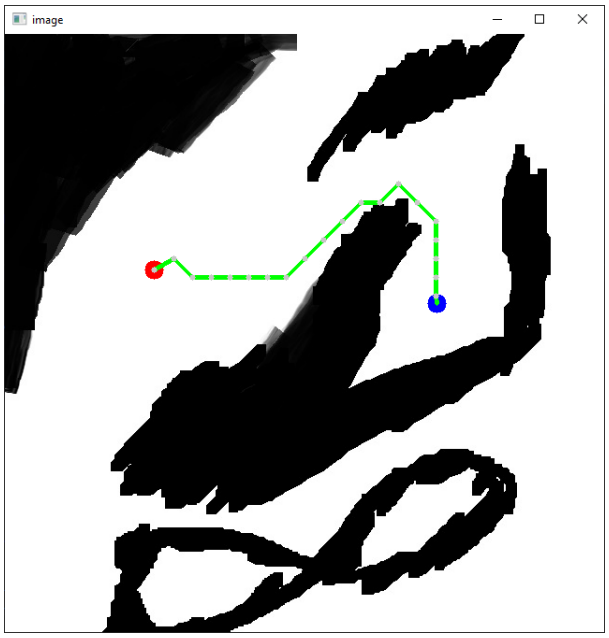


Рис. 2. Построение маршрута A на сложной местности*

Рассмотрим ADRRT*-Connect-алгоритм. Данный алгоритм относится к семейству RRT (древовидных) алгоритмов, суть которых заключается в построении случайных деревьев и их анализе.

Для работы алгоритма необходимо создавать точки, в которых будет храниться следующая информация:

1) координаты;
2) родительская точка;
3) дочерние точки;
4) направление построения (определяется как угол между горизонталью и прямой, соединяющей родительскую и данную точки).

Также необходимо хранить массив всех конечных точек для просчета.

Алгоритм:

1) создаются две конечные точки – в начальной и целевой точках (для роста дерева в двух направлениях);
2) проводится проход по массиву конечных точек;
3) для каждой точки строятся дочерние в некоторых случайных координатах в окружности или полуокружности (задается в настройках алгоритма) с определенным радиусом;
4) проверяется возможность достижения данных точек: если точка достижима – добавляется в массив конечных, если нет – не учитывается в дальнейшем;
5) выполняется до тех пор, пока нельзя будет соединить любые точки двух деревьев;
6) маршрут разворачивается в обратных направлениях (по родителям) и стыкуется.

Точкой выхода является момент отсутствия конечных точек или достижение какого-то предела расчетов (например, 100 повторений), обусловленного возможностью алгоритма петлять и возвращаться в начало.

Для динамического перестроения необходимо найти точки разрывов, далее, учитывая все дочерние и родительскую точки, достроить маршрут с двух концов. При этом методика полного перестраивания не применяется для таких типов алгоритмов. Пример работы алгоритма представлен на рис. 3; 4.

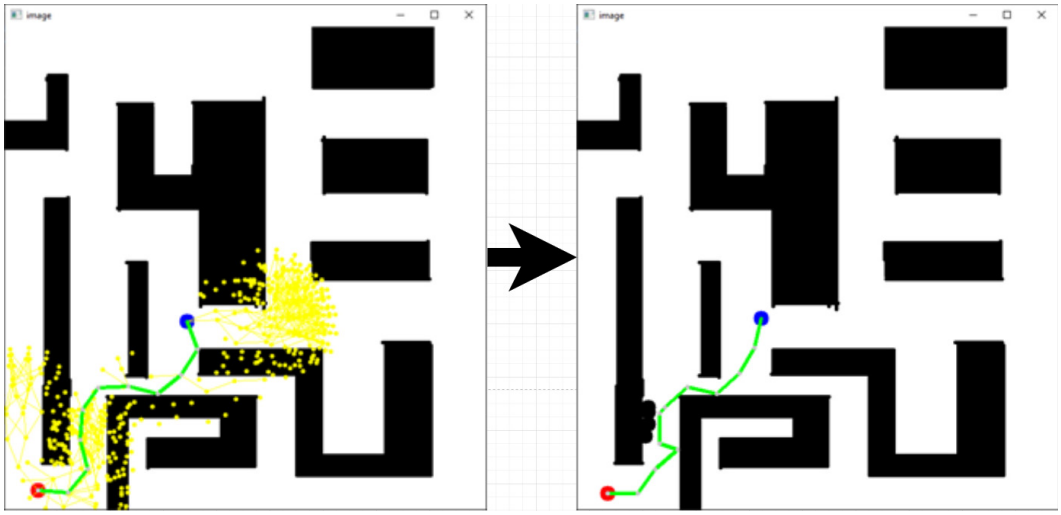


Рис. 3. Построение маршрута ADRRT-Connect и динамическое перестроение*

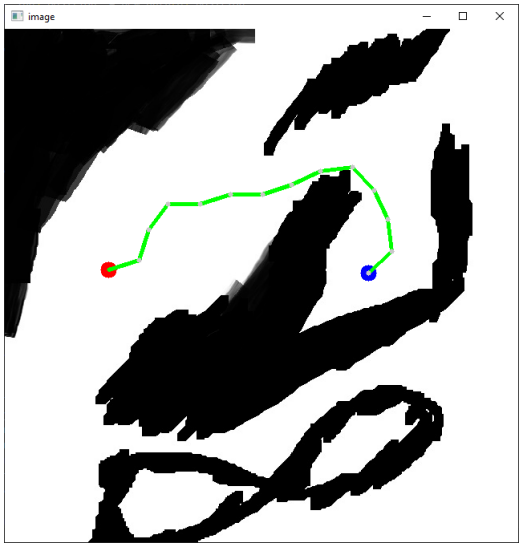


Рис. 4. Построение маршрута ADRRT-Connect на сложной местности*

При этом данный алгоритм обладает проблемой вероятностного нахождения маршрута. Иногда алгоритм не просчитывает потенциальные пути вследствие неправильного роста дерева (рис. 5).

Для устранения данной проблемы применяют адаптивный метод роста дерева, в котором длина ветви меняется динамически в зависимости от частоты встречи с препятствиями. Однако такой подход требует значительных вычислительных мощностей.

Соответственно, можно выделить следующие преимущества алгоритма:

– отсутствие привязки к конкретной сетке;

– учет всей ранее просчитанной информации;

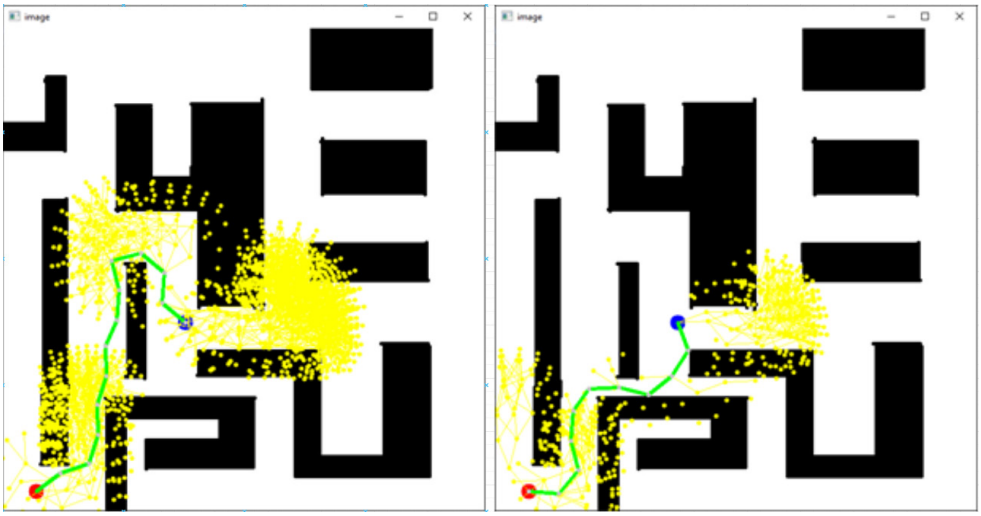


Рис. 5. Построение неоптимального и оптимального маршрутов

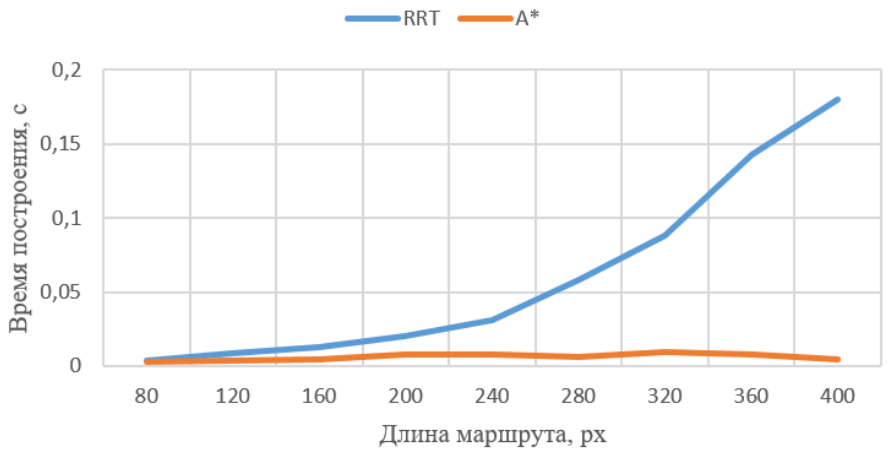


Рис. 6. Зависимость времени просчета алгоритмов от длины маршрута

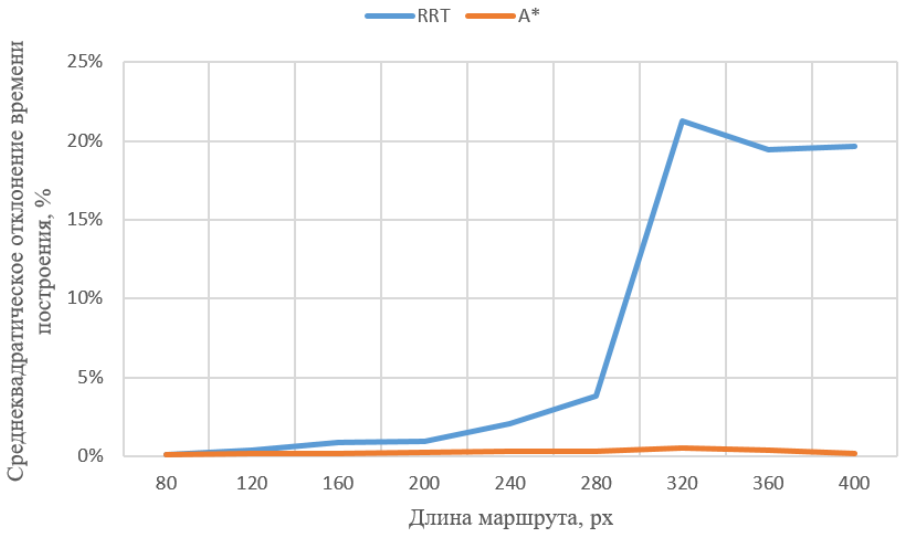


Рис. 7. Зависимость среднеквадратического отклонения времени просчета алгоритмов от длины маршрута

– плавность построенных маршрутов.

Недостатки:

– малая повторяемость алгоритма и стабильность;

– малая скорость просчета алгоритма.

Для сравнительного анализа работы алгоритмов построим зависимости времени просчета алгоритмов от длины итогового маршрута и среднеквадратического отклонения времени просчета (рис. 6; 7).

Данные графики подтверждают выводы о нестабильности работы алгоритма ADRRT*-Connect (на длине маршрута 280 пикселей и выше отклонение достигает 20 %), а также о медленной скорости работы алгоритма в сравнении с A*.

Следовательно, для двумерной сложной местности имеет смысл применения алгоритма A* вместо специально подготовленного для этого ADRRT*-Connect. При этом для достижения плавности маршрутов и для учета всей сложности поверхности необходимо введение адаптивной сетки (время просчета сетки компенсируется стабильностью алгоритма и скоростью просчета). Также во все приведенные алгоритмы необходимо внедрять системы сглаживания получившихся траекторий.

Стоит также отметить, что ADRRT*-Connect, благодаря вероятностным принципам построения маршрутов, будет более эффективно выполнять задачи стохастического движения. Такие задачи могут встречаться

в патрулировании, случайном исследовании территории.

Список источников

1. *Chen Y., Wang L.* Adaptively dynamic RRT*-connect: Path planning for UAVs against dynamic obstacles // 7th International conference on automation, control and robotics engineering (CACRE). 2022. P. 1–7.

2. *Hoshino S., Takahashi K.* Dynamic partitioning strategies for multi-robot patrolling systems // Journal of robotics and mechatronics. 2019. P. 535–545.

3. *Li X., Ma Y.* Analysis of multi-robot patrolling algorithms // Journal of physics: conference series. 2023. P. 1–12.

4. *Piskorskii D. S., Abdullin F. K., Nikolaeva A. R.* Optimization of a-star search algorithm // Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technologies, automatic control, radio electronics. 2020. Vol. 20, № 1. P. 154–160. (In Russ.). Doi: 10.14529/ctcr200115. EDN PRWNKB.

5. *Белков Д. Н., Пономарев И. В.* Методы и алгоритмы построения оптимального пути // Труды семинара по геометрии и мат. моделированию. 2020. № 6. С. 78–81. EDN GBWHGN.

УДК 681.53 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-167-170**

Л. В. Камышева*
старший преподаватель
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Рассмотрены особенности систем автоматического управления электроприводом на основе бесколлекторных двигателей. Они обладают относительно низкой скоростью вращения и позволяют использовать прямой привод, который отличается компактностью и надежностью. Однако в этих системах может быть заметна зависимость электромагнитных свойств от угла поворота ротора, особенно это касается изменения индуктивности, включая взаимоиндуктивность между ротором и статором. Эта особенность может приводить к колебаниям тока и, как результат, к колебаниям вращающего момента.
Ключевые слова: *бесколлекторные двигатели, система автоматического управления, электропривод постоянного тока, математическая модель.*

L. V. Kamysheva*
Senior Lecturer
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

FEATURES OF AUTOMATIC CONTROL OF THE ELECTRIC DRIVE WITH A BRUSHLESS MOTOR

The features of automatic control systems of electric drives based on brushless motors are considered. They have a relatively low rotation speed and allow the use of a direct drive, which is compact and reliable. However, in these systems, the dependence of electromagnetic properties on the angle of rotation of the rotor may be noticeable, especially with regard to changes in inductance, including the mutual inductance between the rotor and the stator. This feature can lead to current fluctuations and, as a result, to torque fluctuations.
Keywords: *brushless motors, automatic control system, DC electric drive, mathematical model.*

Бесколлекторные моторы широко применяются в электрическом приводе. Они используются в различных устройствах, включая электромобили, дроны, робототехнические системы и промышленное оборудование. Основной принцип работы бесколлекторных моторов состоит в передаче переменного тока через обмотки статора, которые создают вращающееся магнитное поле. На роторе мотора находятся постоянные магниты, которые взаимодействуют с магнитным полем статора и приводят к вращению ротора.

Преимущества бесколлекторных моторов включают высокую эффективность, высокую плотность мощности, компактные размеры, надежность и долговечность. Они также обладают высоким коэффициентом мощности и могут обеспечивать момент сопротивления на всех скоростях вращения.

Благодаря своим преимуществам, бесколлекторные моторы широко применяются в различных приводах, особенно в случаях, когда требуется точное позиционирование и быстродействие. Они также имеют широкий диапазон скоростей и могут быть управляемыми с помощью контроллеров, что делает их идеальными для автоматического управления и регулирования.

Управление бесколлекторными двигателями происходит при помощи электронных регуляторов скорости или контроллеров. Они мониторят и контролируют сигналы, поступающие из датчиков положения ротора, чтобы определить момент времени, когда электромагнитные поля вращающегося ротора должны изменяться, чтобы управлять его движением.

Бесколлекторные двигатели имеют несколько обмоток статора, разделенных на несколько секторов. Когда сектор статора находится вблизи магнита на роторе, электронный контроллер пускает ток по соответствующей обмотке статора, чтобы создать электромагнитное поле, взаимодействующее с магнитом на роторе и вызывающее его вращение. Когда ротор поворачива-

ется, контроллер переключает энергию на следующие секторы статора, чтобы продолжить вращение ротора.

Для определения положения ротора используются датчики положения, такие как датчики Холла или энкодеры. Они сообщают контроллеру о текущем положении ротора, что позволяет ему точно контролировать моменты переключения секторов статора и обеспечивать нужную скорость и направление движения. На рисунке показаны схема электропривода с бесколлекторным двигателем и пример протекания тока в определенный момент времени.

Фазные напряжения на обмотках статора можно представить в виде:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} L_a(\theta_э) - L & 0 & 0 \\ 0 & L_b(\theta_э) - L & 0 \\ 0 & 0 & L_c(\theta_э) - L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \times \\ \times \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix},$$

где R – активное сопротивление обмоток статора; $L(\theta_э)$ – функции индуктивности обмоток статора для фаз A, B и C; L – взаимоиндуктивность обмоток статора; $\theta_э$ – электрический угол поворота ротора, зависящий от количества пар полюсов двигателя ($\theta_э=(p\theta)/2$).

Взаимоиндуктивность – это физическая характеристика электрической цепи, которая определяет возникновение электромагнитной индукции в одной катушке под влиянием переменного тока в другой катушке.

Управление бесколлекторными двигателями может быть аналоговым или цифровым. В аналоговом управлении используется изменение амплитуды или частоты электрического сигнала, подаваемого на статор, чтобы изменять скорость. В цифровом управлении используется микроконтроллер или программируемая логическая схема, которая обрабатывает сигналы от датчиков и вычисляет оптимальное управление для достижения требуемой скорости и мощности двигателя [1].

Датчик Холла – это электронный датчик, основанный на явлении Холла. Он использует магнитное поле для определения положения и скорости вращения ротора бесколлекторного двигателя. Датчик Холла состоит из магнита, обмотки и датчика, который измеряет изменение магнитного поля. Когда ротор двигателя вращается, возникает изменение магнитного поля вблизи датчика Холла. Датчик реагирует на это изменение и преобразует его в электрический сигнал. Это позволяет регулировать скорость вращения и направление движения мотора.

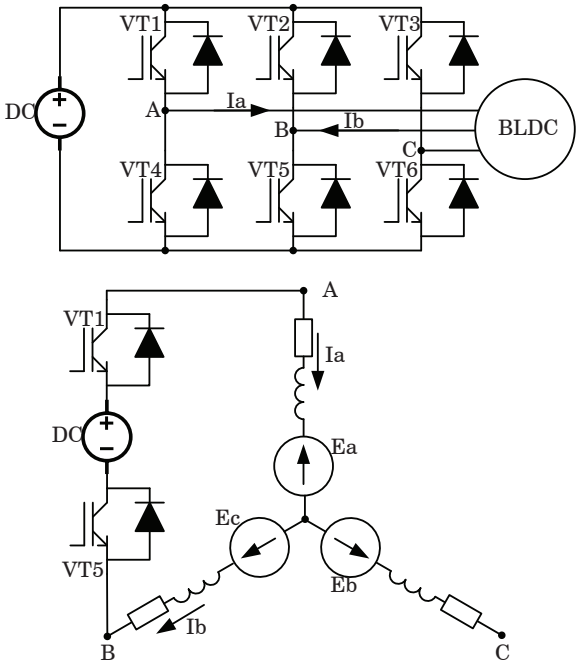


Рис. 1. Устройство электропривода с бесколлекторным двигателем

Таким образом, датчик Холла помогает управлять бесколлекторным двигателем, обеспечивая точное определение положения ротора и позволяя контролировать скорость и направление вращения [2].

При управлении двигателем уравнение электромагнитного и механического момента представляется в виде:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega};$$

$$J\frac{d\omega}{dt} + B\omega = (T_e - T_L).$$

При управлении двигателем обратная связь осуществляется через датчики Холла в виде аналогового сигнала, однако для упрощения сразу представим их в виде дискретных величин: 1 – при максимальном приближении датчика к источнику магнитного поля и 0 – при максимальном удалении датчика от источника магнитного поля.

В таблице приведены взаимоотношения сигналов датчиков Холла, угла поворота ротора и вариантов открытия ключей.

Взаимосвязи угла поворота ротора и открытия пары вентилей

Угол поворота ротора, град.	Показания датчика Холла на каждой фазе			Открытые пары ключей
	A	B	C	
0–60	1	0	0	VT1 и VT5
60–120	1	1	0	VT1 и VT6
120–180	0	1	0	VT2 и VT6
180–240	0	1	1	VT2 и VT4
240–300	0	0	1	VT3 и VT4
300–360(0)	1	0	1	VT3 и VT5

Фазный ток в каждой фазе регулируется с помощью компараторов, которые мониторят разницу в токах и управляют переключением ключей инвертора. Это позволяет изменять фазный ток путем его увеличения или уменьшения. Основные подсистемы при управлении бесколлекторным двигателем постоянного тока представлены в виде блока вычисления скорости, электромагнитного момента и угла поворота ротора двигателя, блока вычисления фазных токов, блока вычисления текущих значений фазных индуктивностей и блока преобразования сигналов датчика Холла в дискретный вид.

Однако необходимо также компенсировать изменение индуктивности. Для этого можно использовать два способа – адаптивную и неадаптивную компенсации [3].

Адаптивная компенсация используется для поддержания стабильной работы мотора при изменении индуктивности обмоток из-за различных факторов, таких как температура, частота и нагрузка.

В бесколлекторных моторах индуктивность обмоток играет важную роль в их работе. Она влияет на задержку фазы тока в обмотках и определяет эффективность мотора. При изменении индуктивности обмоток может произойти смещение фазы тока и нарушение работы мотора. Адаптивная компенсация изменения индуктивности может осуществляться с помощью специальных алгоритмов управления, которые обновляют параметры управления мотором на основе измерения текущей индуктивности обмоток.

Таким образом, при изменении индуктивности обмоток, алгоритмы компенсации принимают соответствующие меры для подстройки управления мотором и обеспечивают его стабильную работу [4].

Адаптивный алгоритм имеет вид:

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\gamma\frac{dJ}{d\alpha} = -\gamma e\frac{de}{d\alpha},$$

где γ – коэффициент адаптации; α – формируемый управляющий сигнал;

$$\alpha = \alpha_0 - \gamma e\frac{de}{d\alpha}.$$

Дополнительно составляются передаточная функция двигателя, эталонная передаточная функция, и целевая функция.

Неадаптивная компенсация изменения индуктивности в бесколлекторных моторах означает, что система управления не корректирует параметры работы для учета изменений в индуктивности мотора в автоматическом режиме. При неадаптивной компенсации изменения индуктивности обратная связь отсутствует, и система управления не может автоматически корректировать свои параметры.

Регулирование происходит за счет составления неадаптивного регулирующего компенсатора. Она включает эталонную модель первого порядка и подстройку пропорционального коэффициента ПИ-регулятора по разнице скоростей двигателя [5].

Пропорциональный коэффициент имеет вид:

$$K = \frac{1 + (L_{\text{макс}} - L)\Delta\omega}{2K_{\text{тп}}K_iT_i},$$

где $K_{\text{тп}}$ – коэффициент усиления преобразователя частоты; K_i – коэффициент усиления контура регулирования тока; T_i – коэффициент времени измерителей тока и преобразователей частоты; $L_{\text{макс}}$ – максимальная индуктивность обмоток статора.

Необходимо подчеркнуть еще один ключевой фактор, который влияет на качество процессов в контуре тока данного электропривода – тактовая работа микропроцессорного регулятора. Удлинение рабочего такта регулятора в два раза не только увеличивает квазипериод колебаний, но и приводит к увеличению амплитуды колебаний. Для адекватного моделирования работы электропривода с высокомоментным бесколлекторным двигателем необходимо рассматривать привод как мехатронный объект, т. е. с учетом взаимосвязи электромагнитных и механических процессов, а также учитывать законы управления и способы их реализации с помощью микропроцессора.

Игнорирование зависимости индуктивности двигателя от углового положения ротора приводит к потере информации, которая имеет принципиальное значение для управления фазными токами статорной обмотки [6].

Представлены возможности компенсации влияния указанной зависимости при помощи

управляющих средств – неадаптивной и адаптивной схем. Применение адаптивного регулятора в контуре тока оказалось более эффективным по сравнению с неадаптивной схемой компенсации. На качество компенсации большое влияние оказывает скорость реакции микропроцессорного регулятора, так как время расчета управляющего сигнала, которого можно достичь с помощью существующих микропроцессорных средств, соизмеримо с электромагнитной постоянной времени данного двигателя.

Список источников

1. *Гаврилов С. В., Занг Д. Т., Тхань Н. Д.* Управление электроприводом на основе бесколлекторного двигателя с постоянными магнитами // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2016. № 8. С. 53–62.

2. Разработка модели систем высококачественного бесколлекторного электропривода постоянного тока / Т. Х. Абузяров, А. С. Плехов, А. Б. Дарьенков, А. И. Ермолаев // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. 2020. № 1. С. 31–45.

3. *Mondal S., Mitra A.* A new approach of sensorless control methodology or achieving ideal characteristics of brushless DC motor using MATLAB Simulink // IEEE computer, communication, control and information technology (C3IT). 2015 – Third Intern. Conf. 2015. Vol. 22, is. 2. P. 15–24.

4. *Meenakshy P. P.* Modelling of brushless DC Motor drive using sensored and sensorless control // IJETAE. 2012. Vol. 2, is. 8. P. 153–162.

5. *Azzam A. A., Abdelmageed E. A.* A novel model reference adaptive controller design for a second order system // Intern. conf. on computing, control, networking, electronics and embedded systems engineering, IEEE. 2015. P. 409–413.

6. *Куцулим Д. В., Рысин А. В., Соленый С. В.* Управление приводами универсального промышленного робота // Завалишинские чтения – 23: сб. докл. XVIII Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике (СПб., 18–19 апр. 2023 г.). СПб.: ГУАП, 2023. С. 226–229.

УДК 681.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-171-173**

С. Л. Морева*
кандидат технических наук, доцент
А. Л. Ляшенко*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

БАРАБАН-СЕПАРАТОР КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрены устройство и принцип действия барабана-сепаратора гравитационного типа. Исследован технологический процесс, протекающий в барабане, и на основе полученных результатов составлена математическая модель. Разработано программное обеспечение для решения математической модели и моделирования работы замкнутой системы управления.
Ключевые слова: *барабан-сепаратор, математическая модель, система управления, контроль, диагностика, системный анализ, регулятор, моделирование, передаточная функция, графики.*

S. L. Moreva*
PhD, Tech., Associate Professor
A. L. Lyashenko*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DRUM SEPARATOR AS A CONTROL OBJECT

The design and operating principle of a gravity-type separator drum are considered. The technological process occurring in the drum was studied and a mathematical model was compiled based on the results obtained. Software has been developed to solve a mathematical model and simulate the operation of a closed-loop control system.
Keywords: *drum-separator, mathematical model, control system, control, diagnostics, system analysis, regulator, modeling, transfer function, graphs.*

Одним из важнейших элементов паровых котлов является сепаратор пара барабанного типа. Основное назначение барабана-сепаратора (БС) заключается в разделении пароводяной смеси и получении на выходе насыщенного пара. Кроме того, в БС создается запас воды, необходимый в переходных и аварийных режимах работы, а также производится смешение питательной воды с отсепарированной насыщенной водой, для чего в выходных, водоотводящих патрубках БС установлены специальные смесители [1]. В связи с этим БС содержит большую часть воды, заполняющей циркуляционный контур.

В работе рассмотрим БС, реализующий гравитационный способ сепарации, основанный на использовании сил тяжести для разделения легкой и тяжелой фаз двухфазной смеси.

Одной из важнейших характеристик БС, точнее, его водяного объема, является величина уровня воды, с которой начинается захват пара в опускные трубопроводы.

Проведем анализ БС как объекта управления.

На рис. 1 схематически показаны потоки двухфазной смеси в БС [1]. Пароводяная смесь с суммарным массовым расходом $G_{тк}$ подается в водяной объем БС по индивидуальным трубопроводам. Поток пароводяной смеси делится на две части: первая часть $G_{пдл}$ поступает вверх через погруженный дырчатый лист, образуя на нем так называемый барботажный слой, на верхней границе которого начинается процесс осушения пара. Вторая часть двухфазной смеси $G_{ндл}$ попадает в межкоробовое пространство через отверстия наклонных дырчатых листов. Пар $G_{дт}$ отводится вверх по «дыхательным» трубам.

В уравновешенном состоянии БС характеризуется равенством между количеством поступающей воды и расходом пара. Если данное условие соблюдается, то уровень воды $H_{пп}$ (рис. 1) будет постоянным. При регулировании уровня его изменение от заданного не должны превышать (±20–30) мм, так как в случае отказа системы автоматического регулирования (САР) достаточно 3–4 мин до упуска воды из БС или

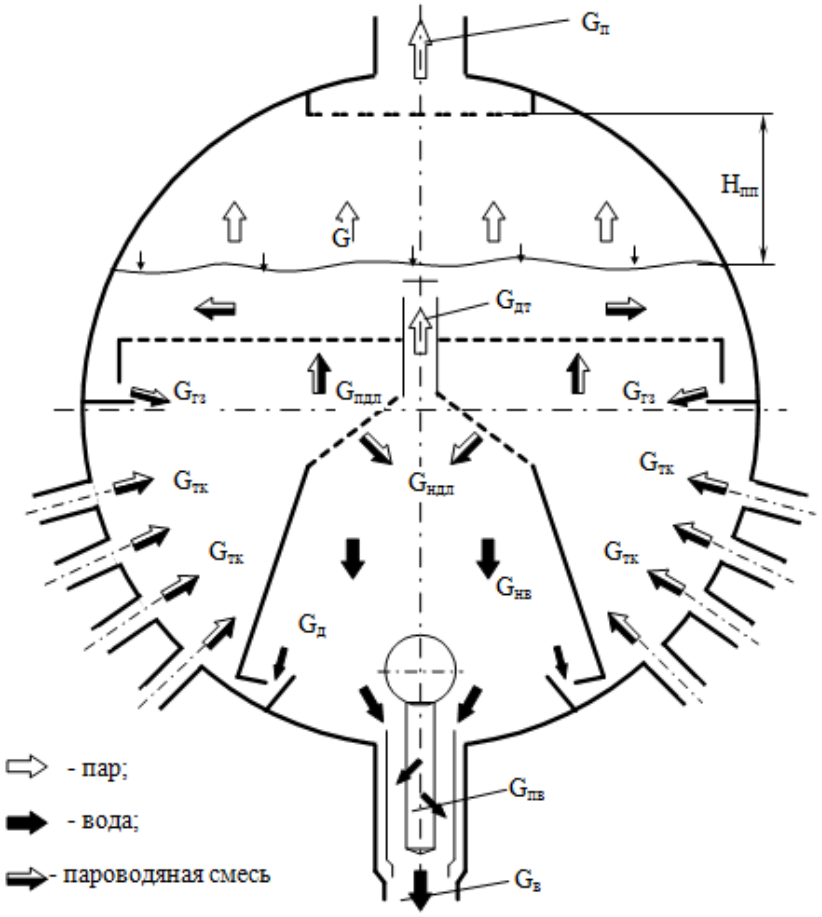


Рис. 1. Схема потоков теплоносителя в барабане-сепараторе

его перепитки [3]. Перепитка барабана котла приводит к повышению давления пара, к забросу воды в паропровод, гидравлическим ударам и возможным разрывам паропроводов. Упуск воды приводит к разрыву экранных труб и выходу котла из строя.

В [4] рассматривалась система управления уровнем воды в барабане, произведем доработку математической модели данной системы. Для этого учтем влияние сил инерции, вязкости, трения и ряд других параметров, препятствующих удовлетворительному гравитационному разделению фаз [3].

Так, например, для расчета коэффициента сопротивления трения применим выражение:

$$\lambda = 0{,}1\left(1{,}46\frac{\Delta}{d_{\text{г}}} + \frac{100}{\text{Re}\cdot\chi}\right)^{0{,}25}. \qquad (1)$$

В данном выражении Δ – абсолютная шероховатость; $d_{\text{г}}$ – гидравлический диаметр; Re – критерий Рейнольдса; χ – коэффициент формы сборки, рассчитываемый по формуле (2):

$$\chi = \frac{2\varepsilon}{(1-\varepsilon)^2}\left(\frac{\varepsilon}{2} - \frac{3}{2} - \frac{\ln\varepsilon}{1-\varepsilon}\right). \qquad (2)$$

Коэффициент негомогенности двухфазной смеси при расчете потерь на трение вычисляется, согласно [2], по формуле (3):

$$\psi = \left[1 + 0{,}57\left(\frac{1}{0{,}2 + \frac{w_o}{\sqrt{gd_z}}\frac{\gamma''}{\gamma'}} - 5{,}2x^2\right)x^{0{,}125}(1-x)^2\right]\times$$

$$\times\left[1 + x\left(\frac{\mu'}{\mu''} - 1\right)^{-0/2x}\right], \qquad (3)$$

где γ' и γ'' – плотность воды и пара; μ' и μ'' – динамическая вязкость воды и пара; g – ускорение свободного падения.

В работе был учтен нивелирный перепад ΔP, рассчитываемый по формуле (4):

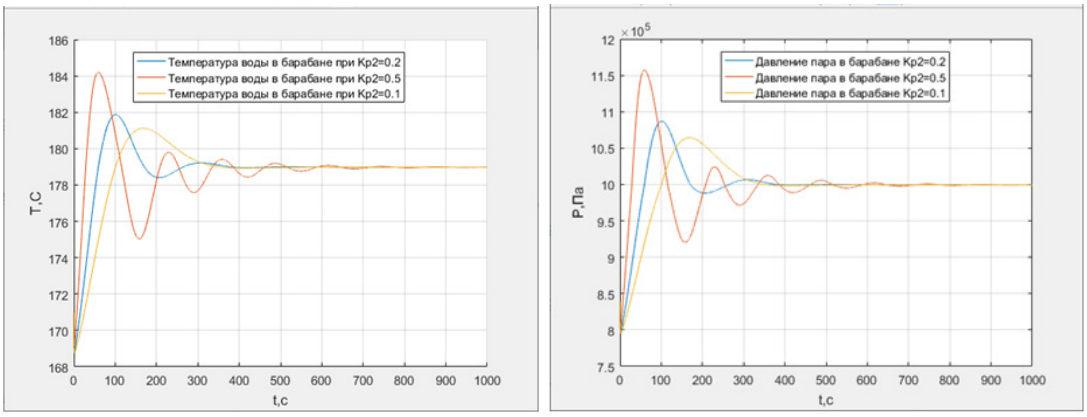


Рис. 2. Температура воды и давление пара в барабане

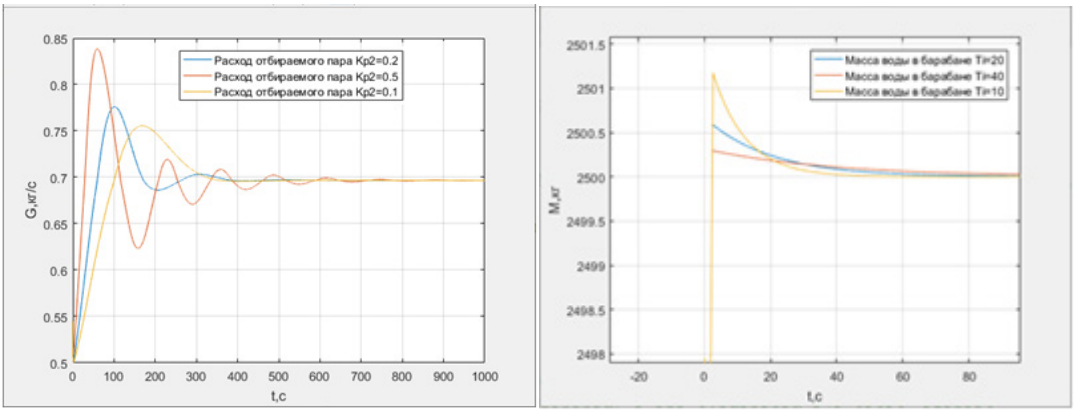


Рис. 3. Расход отбираемого пара и изменение массы воды в барабане

$$\Delta P_{\text{нив}} = g\left[\rho'(1-\phi)+\phi\rho''\right]\Delta h, \qquad (4)$$

где Δh – разность нивелирных отметок; ϕ – истинное объемное паросодержание, рассчитываемое по формуле (5):

$$\phi = \left(1+\frac{1-x}{x}\frac{\gamma''}{\gamma'}K\right)^{-1}, \qquad (5)$$

где K – коэффициент проскальзывания вычисляется по формуле (6):

$$K = 1+\frac{0{,}6+1{,}5\beta^2}{\sqrt[4]{w_0^2/(gd_z)}}\left(1-\frac{P}{225{,}6}\right). \qquad (6)$$

Разработанная математическая модель легла в основу программного обеспечения, с помощью которого производилось моделирование работы рассматриваемой системы. С помощью данной программы были получены графики интересующих нас переходных процессов, например, при различных настройках регулятора (рис. 2; 3).

Как показали исследования, разработанная система управления позволяет регулировать уровень воды в барабане-сепараторе в соответствии с технологическими требованиями. Разработанное программное обеспечение дает возможность проводить исследования работы барабана при различных входных воздействиях и различных алгоритмах управления.

Список источников

1. Тепловой расчет котельных агрегатов / под ред. Н. В.Кузнецова [и др.]. М.: Энергия, 1993.

2. *Абрамов М. А., Авдеев В. И., Адамов Е. О.* Канальный ядерный энергетический реактор РБМК / под общ. ред. Ю. М. Черкашова. М.: ГУП НИКИЭТ, 2006. 632 с.

3. *Ривкин С. Л., Александров А. А.* Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1980.

4. *Ляшенко А. Л., Морева С. Л.* Разработка системы управления уровнем воды в барабане парового котла // Завалишинские чтения – 2020: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2020. С. 117–121.

УДК 681.5.013 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-174-178**

В. Ф. Шишлаков*
доктор технических наук, профессор
Н. В. Решетникова*
старший преподаватель
А. Г. Панкратов*
студент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ

Рассмотрен параметрический синтез регулятора обобщенным методом Галеркина сверхпроводниковой электроэнергетической установки при дрейфе постоянных времени неизменяемой части системы и изменении требований к показателям качества регулирования.
Ключевые слова: *сверхпроводниковая электроэнергетическая установка, нестационарные системы, высокотемпературные сверхпроводники, системы автоматического управления.*

V. F. Shishlakov*
Dr. Sc., Tech., Professor
N. V. Reshetnikova *
Senior Lecturer
A. G. Pankratov*
Student
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

PARAMETRIC SYNTHESIS OF SUPERCONDUCTING POWER PLANT AUTOMATIC CONTROL SYSTEM UNDER NON-STATIONARITY CONDITIONS

The paper considers the parametric synthesis of the regulator by the generalized Galerkin method of a superconducting electric power plant under the drift of time constants of the unchanged part of the system and changing requirements to the quality indicators of regulation.
Keywords: *superconductor power plant, unsteady systems, high temperature superconductors, automatic control systems.*

Автономная электроэнергетическая установка (ЭЭУ) представляет собой комплекс технологических приборов и элементов, предназначенных для обеспечения электропитанием потребителей без подключения к централизованной электросети. В состав электроэнергетического комплекса входят синхронный генератор высокотемпературной проводимости (ВСТП) с постоянными магнитами, распределительные устройства, программируемые контроллеры и преобразователи [1, 2].

При работе электроэнергетической установки в динамических режимах, таких как пуск либо кратковременное превышение скорости ветроколеса ввиду погодных условий, могут произойти резкое увеличение угла нагрузки и выход синхронного генератора из синхронизма, а следовательно, и остановка всей системы. Поэтому требуется выполнить уточнение параметров регулятора, управляющего скоростью вращения генератора. Для этого требуется исследовать модель ЭЭУ при первичном расчете регулятора, выдвинуть новые требования к показателям качества системы и выполнить пересчет параметров регулятора.

В работе проводится исследование многофункциональной комбинированной сверхпроводниковой электроэнергетической установки, построенной на основе использования солнечной и ветряной энергии. Преобразование механической энергии ветроколеса в электрическую обеспечивает синхронный генератор (рис. 1), работающий на основе эффекта высокотемпературной сверхпроводимости. Использование

ВТСП обусловлено более высокой энергоэффективностью по сравнению с генераторами, рабочие обмотки которых выполнены из меди.

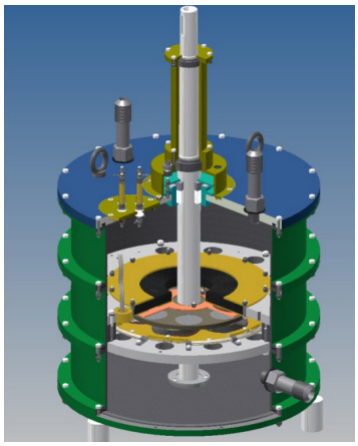


Рис. 1. Сверхпроводниковый синхронный ветрогенератор мощностью 5 кВт

Электроэнергетический комплекс включает в себя три контура управления, обеспечивающие контроль параметров установки (табл. 1).

Таблица 1

Контуры управления электроэнергетической установкой

1-й контур	Отвечает за регулирование пуска генератора, контроль показателей качества выхода на номинальные скорости работы
2-й контур	Обеспечивает переключение источников энергии: ВТСП-ветрогенератор, аккумуляторная батарея, солнечная батарея – при изменении погодных и технических условий
3-й контур	Выполняет реализацию удаленного управления работой, контроля и помощи оператора в случае аварийной ситуации

Структурная схема математической модели ЭЭУ [3] приведена на рис. 2.

Из структурной схемы математической модели ЭЭУ (рис. 2) следует, что система автоматического управления состоит из автоматического регулятора частоты и регулятора напряжения синхронного генератора, приводимого за счет управляемого двигателя соизмеримой мощности, имитирующего работу ветроколеса, без коррекции частоты оборотов.

На рис. 2 приведены следующие обозначения: T_M – постоянная времени приводного двигателя; $\sigma_\nu(t)$ – сигнал на выходе регулятора скорости; $g_\nu(t)$ – внешнее возмущающее воздействие в канале изменения частоты, действующее на приводной двигатель; $u_\Gamma(t)$ – напряжение на выходе ЭЭУ; $\nu(t)$ – скорость вращения приводного двигателя (частота напряжения на выходе ЭЭУ); $T_{\nu1}$, $T_{\nu2}$, $T_{\nu3}$, $T_{\nu4}$, $T_{\nu5}$, k_ν – постоянные времени и коэффициент передачи регулятора скорости вращения приводного двигателя; $\Delta\nu(t)=\nu_0(t)-\nu(t)$ – относительное изменение скорости вращения приводного двигателя, где $\nu_0(t)$ – заданное значение скорости (частоты напряжения на выходе установки); $T_{Я1}$, $T_{Я2}$ – постоянные времени синхронного генератора, обусловленные реакцией якоря на постоянные магниты; $(1-\gamma)$ – коэффициент, характеризующий режим работы синхронного генератора; $u_П$ – напряжение, обусловленное потоком самих магнитов; $g_u(t)$ – внешнее возмущающее воздействие в канале регулирования напряжения, действующее на синхронный генератор; T_{u1}, T_{u2}, T_{u3}, k_u – постоянные времени и коэффициент передачи регулятора напряжения ЭЭУ; $T_{ОС1}$, $T_{ОС2}$ – постоянные времени звена коррекции в цепи гибкой обратной связи [3].

Время переходного процесса как по напряжению, так и по частоте не должно превышать $t_{ПП}$=0,5 с, величина перерегулирования в процессе изменения скорости вращения приводно-

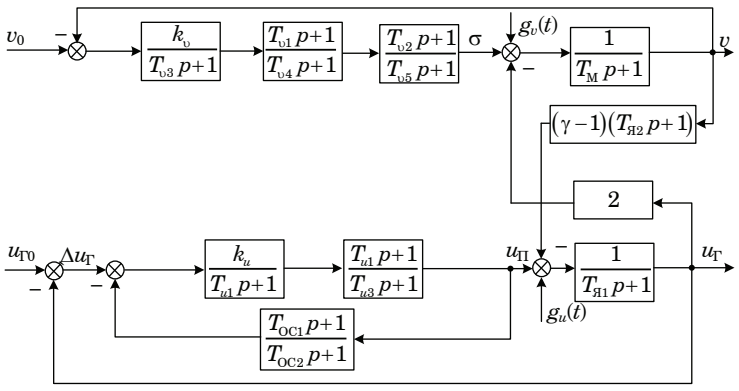


Рис. 2. Структурная схема ЭЭУ

Таблица 2

Исследование изменения показателей качества управления при дрейфе параметров неизменяемой части системы

Параметры объекта V		σ, %		$t_{ПП}$, с		e	
		U	V	U	V	U	
Уменьшение значений постоянных времени							
$T_М$=const, $T_{Я2}$=const	$T_{В1}$ ↓10 %	6,94	2,86	0,272	0,129	$6{\cdot}10^{-3}$	$4{,}5{\cdot}10^{-3}$
	$T_{В1}$ ↓20 %	6,84	1,96	0,276	0,120	$6{\cdot}10^{-3}$	$4{,}5{\cdot}10^{-3}$
$T_М$=const, $T_{Я1}$=const	$T_{В2}$ ↓10 %	7,04	3,67	0,267	0,139	$6{\cdot}10^{-3}$	$4{,}5{\cdot}10^{-3}$
	$T_{В2}$ ↓20 %	7,24	3,67	0,265	0,139	$6{\cdot}10^{-3}$	$4{,}5{\cdot}10^{-3}$
$T_{Я1}$=const, $T_{Я2}$=const	$T_М$ ↓10 %	6,04	3,77	0,232	0,139	$6{\cdot}10^{-3}$	$4{,}5{\cdot}10^{-3}$
	$T_М$ ↓20 %	5,13	3,87	0,182	0,139	$6{\cdot}10^{-3}$	$4{,}5{\cdot}10^{-3}$
Увеличение значений постоянных времени							
$T_М$=const, $T_{Я2}$=const	$T_{В1}$ ↑10 %	6,84	4,47	0,265	0,148	$6{\cdot}10^{-3}$	$4{,}5{\cdot}10^{-3}$
	$T_{В1}$ ↑20 %	6,94	5,27	0,262	0,410	$6{\cdot}10^{-3}$	$4{,}5{\cdot}10^{-3}$
$T_М$=const, $T_{Я1}$=const	$T_{В2}$ ↑10 %	6,74	3,67	0,269	0,138	$6{\cdot}10^{-3}$	$4{,}5{\cdot}10^{-3}$
	$T_{В2}$ ↑20 %	6,54	3,67	0,270	0,138	$6{\cdot}10^{-3}$	$4{,}5{\cdot}10^{-3}$
$T_{Я1}$=const, $T_{Я2}$=const	$T_М$ ↑10 %	7,75	3,57	0,300	0,138	$6{\cdot}10^{-3}$	$4{,}5{\cdot}10^{-3}$
	$T_М$ ↑20 %	8,55	3,47	0,327	0,138	$6{\cdot}10^{-3}$	$4{,}5{\cdot}10^{-3}$

го двигателя не должна превышать σ=10 %. При решении задачи параметрического синтеза ЭЭУ обобщенным методом Галеркина [4] были получены значения искомых параметров регулятора: k_v=340, $T_{υ1}$=2,53 с, $T_{υ2}$=0,15 с, $T_{υ3}$=1,751 с, $T_{υ4}$=0,0054 с, $T_{υ5}$=3 с, k_u=170, T_{u1}=0,01 с, T_{u2}=0,001 с, T_{u3}=0,005 с, $T_{ОС1}$=0,037, $T_{ОС2}$=0,31.

Для исследования системы при критических (предаварийных) условиях работы требуется выполнить моделирование при дрейфе параметров объекта $T_М$, $T_{Я1}$, $T_{Я2}$ (табл. 2). Отклонение данных показателей качества возможно в связи с изменением напряжения управления и реакцией якоря.

Наилучшие показатели величин перерегулирования и времени переходного процесса по частоте наблюдаются при дрейфе постоянной времени приводного двигателя $T_М$ ↓20 % (рис. 3, *а*). Наилучшие показатели качества по напряжению наблюдаются при стационарных значениях постоянных времени приводного двигателя $T_М$ и синхронного генератора $T_{Я2}$ (рис. 3, б).

Из моделирования переходных процессов при уменьшении постоянных времени видно, что даже в случае наибольшего отклонения показателей от номинальных «вниз» величины перерегулирования и времени переходного процесса соответствуют требуемым показателям качества.

Наибольшее отклонение номинальных параметров системы по напряжению наблюдает-

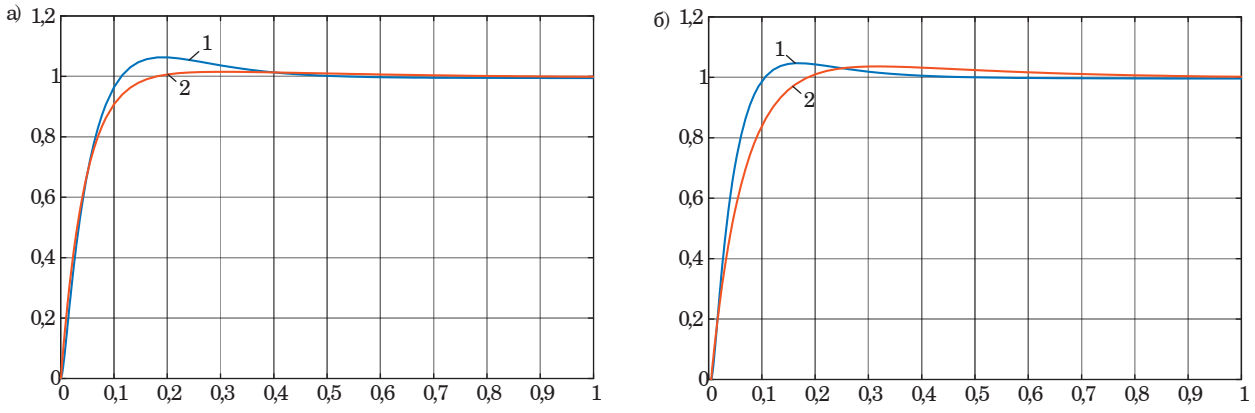


Рис. 3. Переходные процессы по частоте (1) и напряжению (2): а – $T_М$=const, $T_{Я2}$= const, $T_{Я1}$ ↓20 %; б – $T_{Я2}$=const, $T_{Я1}$= const, $T_М$ ↓20 %

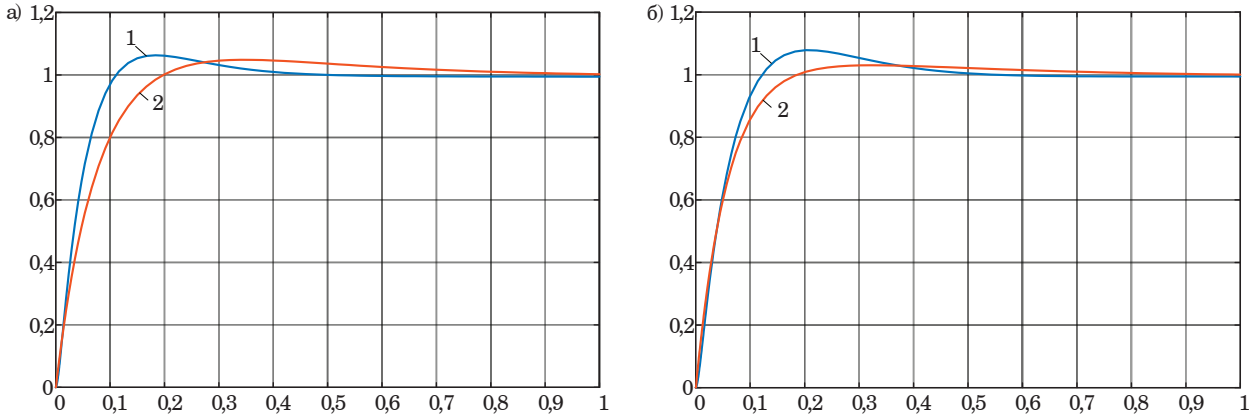


Рис. 4. Переходные процессы по частоте (1) и напряжению (2):
а – T_M=const, $T_{Я2}$= const, $T_{Я1}$ ↑20 %; б – $T_{Я2}$=const, $T_{Я1}$=const, T_M ↑20 %

ся при дрейфе постоянной времени синхронного генератора $T_{Я1}$ «вверх» (рис. 4, *а*). Наибольшее отклонение номинальных параметров системы по частоте наблюдается при дрейфе постоянной времени приводного двигателя T_M «вверх» (рис. 4, *б*).

Как видно из моделирования ЭЭУ, показатели качества при увеличении постоянных времени объекта остаются в пределах требуемых значений.

Исследование при первичном расчете показателей регулятора показало, что смоделированная система является устойчивой и стабильной. Даже в случае дрейфа постоянных времени неизменяемой части системы показатели качества соответствуют требуемым значениям. Так как анализ модели ЭЭУ показал устойчивость синтезированной системы к дрейфу параметров, можно повысить требования к показателям качества системы: переходный процесс по напряжению и частоте оборотов должен иметь экспоненциальный характер, время переходного процесса как по напряжению, так и по частоте не должно превышать $t_{ПП}$=0,2 с.

Для достижения поставленных показателей качества требуется выполнить пересчет параметров регулятора [5]: k_v=68000, $T_{υ1}$=2,53 с, $T_{υ2}$=0,15 с, $T_{υ3}$=1,751 с, $T_{υ4}$=0,0054 с, $T_{υ5}$=3 с, k_u=200, T_{u1}=0,01 с, T_{u2}=0,000001 с, T_{u3}=0,005 с, $T_{ОС1}$=0,037, $T_{ОС2}$=0,62. Переходный процесс повторно синтезированной системы приведен на рис. 5.

Из результатов моделирования видно, что после пересчета показателей регулятора при помощи обобщенного метода Галеркина удалось добиться поставленной задачи. Время переходного процесса уменьшилось, перерегулирование по частоте и напряжению отсутствует.

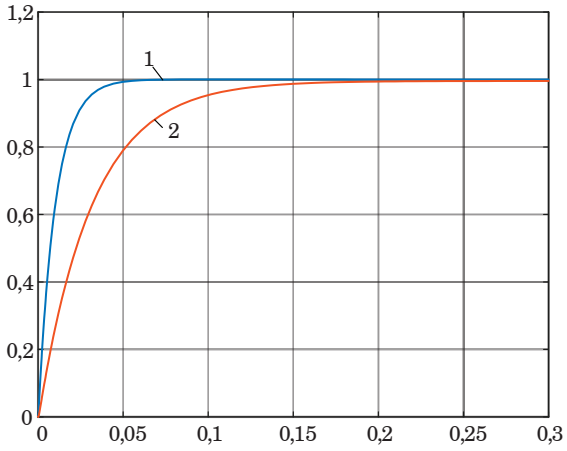


Рис. 5. Переходный процесс в САУ при повторном синтезе

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».

Список источников

1. *Шишлаков В. Ф., Шишлаков А. В., Тимофеев С. С.* Синтез САУ при различных видах аппроксимации нелинейных характеристик: теория и практика: монография / ред. В. Ф. Шишлаков. СПб.: ГУАП, 2017. 151 с.

2. Электроэнергетический комплекс со сверхпроводниковым оборудованием : разработка, создание,

исследование: монография / М. В. Бураков [и др.]; ред.: В. Ф. Шишлаков, Ю. А. Антохина. СПб.: ГУАП, 2018. 255 с.

3. Синтез параметров непрерывных и импульсных многосвязных систем автоматического управления: монография / под ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: СПбГУАП, 2009. 180 с.

4. Общая схема решения задачи синтеза нелинейных нестационарных САУ во временной области / В. Ф. Шишлаков, Н. В. Решетникова, Е. Ю. Ватаева, Д. В. Шишлаков // Датчики и системы. 2020. № 7 (249). С. 12–16.

5. *Шишлаков В. Ф., Решетникова Н. В., Ватаева Е. Ю.* Решение задачи синтеза нелинейных нестационарных систем автоматического управления // Завалишинские чтения – 21: XVI Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике (СПб., 15–18 апр. 2021 г.). СПб.: ГУАП, 2021. С. 163–165.

УДК 681.532.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-179-181**

Д. О. Якимовский*
кандидат технических наук, доцент
Д. Д. Смолянинов*
студент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОДВЕСА СИЛОВОГО ГИРОСКОПА

Представлена кинематическая схема силового гироскопического прибора. Рассмотрены две математические модели движения гироскопа – с учетом и без учета прецессионного движения гиромотора. Проведено моделирование в компьютерной среде MatLab. Представлены результаты моделирования для двух различных моделей при различной жесткости кожуха гироскопа. Проведен сравнительный анализ графиков переходного процесса по скорости вращения подвижной системы силового гироскопа.
Ключевые слова: *силовой гироскопический прибор, прецессионное движение, жесткость кожуха, математическая модель.*

D. O. Yakimovsky*
PhD, Tech., Associate Professor
D. D. Smolyaninov*
Student
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SIMULATION OF THE MOTION OF THE SUSPENSION OF A POWER GYROSCOPE

The article presents a kinematic diagram of a power gyroscopic device. Two mathematical models of gyroscope motion are considered, taking into account and without taking into account the precessional motion of the gyromotor. The simulation was carried out in the Matlab computer environment. The simulation results for two different models with different stiffness of the gyroscope casing are presented. A comparative analysis of the graphs of the transition process according to the rotation speed of the mobile system of the power gyroscope is carried out.
Keywords: *power gyroscopic device, precessional motion, casing stiffness, mathematical model.*

Для ориентации космических аппаратов (КА) используются различные виды систем. Одним из них является силовой гироскоп. Точность ориентации КА напрямую зависит от качества переходного процесса по скорости вращения подвеса гиромотора [1]. При разработке системы управления исполнительным электроприводом силового гироскопа важно учесть специфические для данного типа устройств факторы, оказывающие непосредственное влияние на качество управления. В частности, к данным факторам относится жесткость отдельных элементов силового гироскопического прибора (СГП) [2]. Некорректно выбранная при проектировании СГП жесткость может привести к возникновению колебаний, критически важных для целевых задач КА. В первую очередь, это касается аппаратов дистанционного зондирования, космических телескопов и т. п.

Кинематическая схема СГП показана на рис. 1. Обозначим систему координат, связанную с неподвижным основанием – $0xyz$, а связанную с гиромотором (ГМ) – $0x_1y_1z_1$. Ось прецессии обозначена индексом «z», а ось стабилизации – индексом «y».

На рис. 1 α – угол поворота ГМ относительно оси стабилизации; β – угол поворота ГМ от-

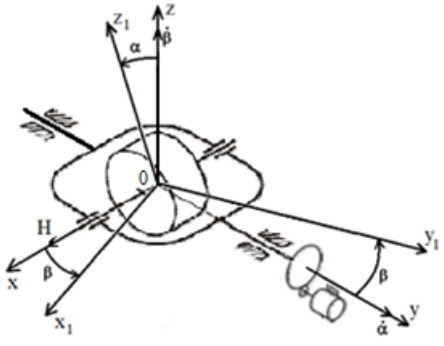


Рис. 1. Кинематическая схема СГП

носительно оси прецессии; $\dot{\alpha}$ и $\dot{\beta}$ – проекции угловых скоростей ГМ относительно осей y и z соответственно; H – кинетический момент маховика ГМ.

Поскольку реальный ГМ двухстепенного силового гироскопа при приложении момента по оси стабилизации совершает прецессионное движение относительно неподвижного основания, математическая модель должна учитывать конечную жесткость креплений оси ГМ к подвесу, а также угол прецессии ГМ.

Технические дифференциальные уравнения движения гироскопа с учетом вращения по двум осям [3] имеют вид:

$$A\ddot{\alpha} - H\dot{\beta} = M_{\text{дв}} - M_c \pm M_{\text{КА}}; \quad (1)$$

$$-B\ddot{\beta} - H\dot{\alpha} - C\beta = 0, \quad (2)$$

где A и B – моменты инерции кожуха относительно осей y и z соответственно; α и β – углы поворота ГМ относительно осей y и z соответственно; H – номинальное значение кинетического момента маховика ГМ; $M_{\text{дв}}$ – создаваемый исполнительным двигателем момент; M_c – момент сопротивления в подшипниках; $M_{\text{КА}}$ – гироскопический момент, создаваемый вращением КА (знак зависит от направления вращения КА); C – жесткость кожуха подвеса ГМ.

При проектировании силового гироскопа может применяться упрощенная модель без прецессионного движения ГМ, которая позволяет не учитывать величины β и B [4]. Для этого внесем в уравнения (1) и (2) некоторые допущения.

Преобразуем уравнения (1) и (2) по Лапласу:

$$A\alpha(s)s^2 - H\beta(s)s = M_{\text{дв}} - M_c \pm M_{\text{КА}}; \quad (3)$$

$$-B\beta(s)s^2 - H\alpha(s)s - C\beta(s) = 0. \quad (4)$$

Преобразуем уравнение (4):

$$\beta(s)(Bs^2 + C) = -H\alpha(s)s; \quad (5)$$

$$\beta(s)\cdot\left(\frac{Bs^2 + C}{C}\right) = -\frac{H\alpha(s)s}{C}; \quad (6)$$

$$\beta(s)\cdot\left(\frac{B}{C}s^2 + 1\right) = -\frac{H\alpha(s)s}{C}. \quad (7)$$

Поскольку коэффициент жесткости кожуха C несравнимо велик по сравнению с величиной B, можем принять:

$$\frac{B}{C} \approx 0. \quad (8)$$

Учитывая данный факт, выведем угол прецессии гироскопа из уравнения (7):

$$\beta = -\frac{H\alpha(s)s}{C}. \quad (9)$$

Подставив (9) в уравнение (3), получим:

$$A\alpha(s)s^2 + \frac{H^2s^2\alpha(s)}{C} = M_{\text{дв}} - M_c \pm M_{\text{КА}}; \quad (10)$$

$$\left(A + \frac{H^2}{C}\right)\ddot{\alpha} = M_{\text{дв}} - M_c \pm M_{\text{КА}}. \quad (11)$$

Для сравнения модели с учетом прецессионного движения ГМ и упрощенной модели без учета величин β и B, а также оценки влияния прецессии ГМ и жесткости кожуха на качество процесса вращения ПС, в компьютерной математической среде MatLab была построена модель исполнительного электропривода [5, 6]. Данная модель позволяет исследовать системы с наличием и отсутствием прецессионного движения ГМ.

Для двух различных систем было проведено моделирование со следующими одинаковыми для обеих моделей исходными данными:

– кинетический момент гироскопа $H = 60$ Н·м;

– задаваемая скорость вращения ПС $\omega_{\text{ПС}} = 10°/\text{с}$;

– время начала переходного процесса по скорости ПС $t = 0{,}1$ с;

– скорость вращения КА $\omega_{\text{КА}} = 2{,}5°/\text{с}$;

– время начала вращения КА $t = 0{,}7$ с.

Графики переходного процесса по скорости вращения ПС в модели с прецессионным движением ПС (w1) и без прецессионного движения ПС (w2) при различном коэффициенте жесткости кожуха C от $5\cdot10^3$ до $1\cdot10^5$ Н·м/рад показаны на рис. 2–5.

В момент времени $t = 0{,}7$ с наблюдается просадка по скорости вращения ПС в связи с дополнительной нагрузкой на привод. При этом в модели w1 наблюдаются нутационные колебания, которые отсутствуют при аналогичном переходном процессе в модели w2. Также наблюдается сходимость результатов при увеличении жесткости кожуха.

Таким образом, исследование посредством моделирования показало, что влияние прецессионного вращения ГМ на качество управления скоростью ПС падает с увеличением жесткости кожуха. Наибольшие различия в моделях с учетом и без учета прецессионного вращения наблюдаются в момент изменения скорости вращения КА. Указанные явления следует учиты-

Рис. 2. Переходный процесс по скорости ПС при жесткости кожуха $5 \cdot 10^3$ Н·м/рад

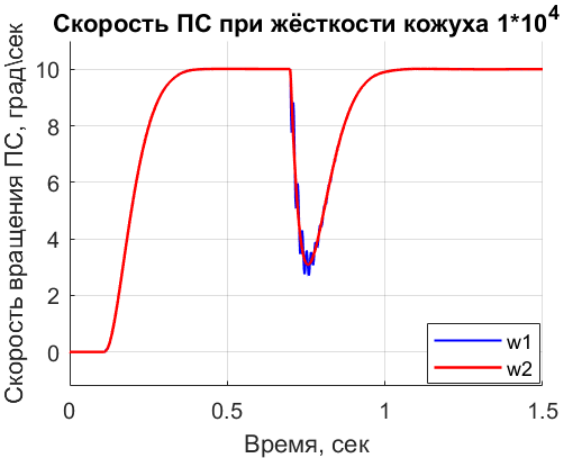


Рис. 3. Переходный процесс по скорости ПС при жесткости кожуха $1 \cdot 10^4$ Н·м/рад

Рис. 4. Переходный процесс по скорости ПС при жесткости кожуха $5 \cdot 10^4$ Н·м/рад

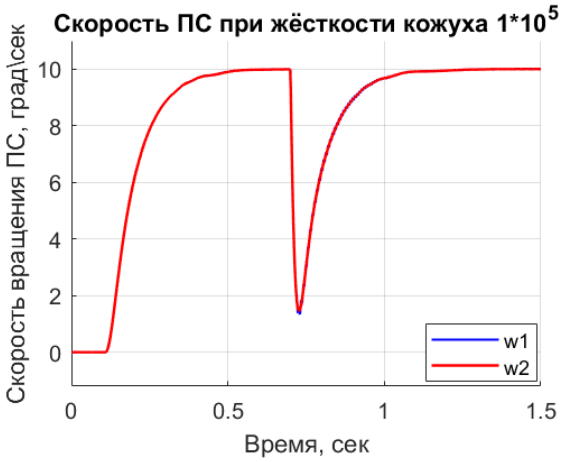


Рис. 5. Переходный процесс по скорости ПС при жесткости кожуха $1 \cdot 10^5$ Н·м/рад

вать при разработке исполнительного электропривода силового гироскопа.

Список источников

1. *Васильев В. Н.* Системы ориентации космических аппаратов / ФГУП НПП «ВНИИЭМ». М., 2009. 310 с.

2. *Ключев В. И.* Теория электропривода. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.

3. *Лысов А. Н.* Прикладная теория гироскопов: учеб. пособие. Ч. 1. Челябинск, 2009. 254 с.

4. *Положенцев Д. С., Смирнов К. А.* Система управления исполнительного электропривода силового гироскопического комплекса // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 8. С. 31–38.

5. *Бураков М. В.* Теория автоматического управления: учеб. пособие. Ч. 1. СПб.: ГУАП, 2013. 254 с.

6. *Онищенко Г. Б.* Автоматизированный электропривод промышленных установок. М.: РАСХН, 2001. 520 с.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 628.9.06 -53.089.62-28.5.073 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-182-189**

А. П. Бобрышов*
аспирант, ассистент
В. П. Кузьменко*
кандидат технических наук, доцент
С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПАРАМЕТРЫ ОСВЕЩЕНИЯ ЭКРАНА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕДУРЫ ПОВЕРКИ

Четвертая промышленная революция, согласно концепции Клауса Шваба, нацелена на полную автоматизацию технологических процессов при помощи использования цифровых и киберфизических технологий и систем. Главная цель технизации различного рода процессов заключается в оптимизации выполняемых задач с точки зрения времени, надежности, гибкости производства, снижения показателей ошибки и т. п. Автоматизация поверки электрических контрольно-измерительных приборов (КИП) не является исключением, на сегодняшний день существуют различные разработки и исследования в данной области. Приводится анализ современных технологических решений в области технизации поверки электрических измерительных устройств. Проводится исследование параметров системы автоматизированной поверки, непосредственно влияющих на качество фиксации измерительных данных с тестируемых КИП. В качестве результата проводимого исследования приводится предложение дополнений условий проведения поверки для автоматизации процедуры.
Ключевые слова: *контрольно-измерительные приборы, измерительные устройства, точность, качество измерительных данных, погрешность, система поверки, компьютерное зрение, освещение, измерения.*

A. P. Bobryshov*
PhD Student, Assistant
V. P. Kuzmenko*
PhD, Tech., Associate Professor
S. V. Solyonyj
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

PARAMETERS OF SCREEN ILLUMINATION OF ELECTRICAL MEASURING AND CONTROL DEVICES DURING THE AUTOMATION OF THE VERIFICATION PROCEDURE

The fourth industrial revolution, according to the concept of Klaus Schwab, is aimed at complete automation of technological processes by means of digital and cyber-physical technologies and systems. The main goal of the technicalization of various processes is to optimize the performed tasks in terms of time, reliability, flexibility of production, reduction of error rates, etc. Automation of verification of electrical test and measurement instruments is not an exception, to date there are various developments and research in this area. In the present article the analysis of modern technological solutions in the field of technicalization of verification of electrical measuring devices is given. The research of parameters of the automated verification system directly affecting the quality of fixing measurement data from the tested instrumentation is carried out. As a result of the conducted research, the proposal of additions to the conditions of verification, to automate the procedure is given.
Keywords: *control and measuring instruments, measuring devices, accuracy, quality of measuring data, error, verification system, computer vision, lighting, measurements.*

Введение

Решение задачи технизации чаще всего сводится к реализации возможности выполнения определенной операции без участия человека. Первыми препятствиями к выполнению автоматизации технологического процесса является физическая, технологическая и информационная возможность осуществления технизации. Наиболее часто в решении задачи оптимизации применяются робототехнические средства и аппаратура регистрации изменения состояний условий работы определенной системы. При этом обработка регистрируемых данных и управление отдельными блоками и частями механизмов осуществляется при помощи специализированной программы. Таким образом, можно отметить явное разделение на исполнительную часть выполнения определенных операций и информационную, обработки и управления общими показателями технической системы. Настройка обработки регистрируемых параметров устанавливает режим работы технологического процесса, имеющий возможность изменения в зависимости от условий выполняемой операции. Данный факт подтверждает высокую значимость автоматизации в контексте полного цикла производства, обеспечивая возможность управления процессом и регулируя итоговую продукцию или выполняемую операцию [1]. Стоит отметить, что системы, построенные по принципу фиксации и отслеживания параметров технологического процесса, синергетически связанного с физической частью и зависящего от него, а также использующие технологии информационных вычислительных ресурсов в физической сущности, определяются как киберфизические [2].

Технологические, физические и информационные рамки являются не единственными требованиями в построении автоматизированной системы. Одним из ключевых требований, относящихся также к настройке технизированной системы, является контроль качества продукции или выполняемых технологических операций. Главной задачей автоматизации является повышение параметров эффективности, надежности, качества, снижение показателей брака или ошибки и т. п. Стоит отметить, что согласно ГОСТ 15467-79 «Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения» параметр качества отражает совокупность свойств продукции, обусловливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением [3]. Стандартом ГОСТ Р ИСО 9000-2015 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» устанавливается определение соответствие понятия качества установленным требованиям и нормам определенного процесса или контроля продукции [4]. В своей статье на тему «Современное состояние теории, средств и методов автоматизации технологических процессов сельскохозяйственного производства» Н. В. Войнова отмечает, что автоматизация непосредственно улучшает качество производственных процессов посредством повышения эффективности, производительности, качества продукции и минимизации объема отходов на производстве [5]. В контексте поверки электрических контрольно-измерительных приборов (КИП) главными параметрами определяются точность проводимой аттестации и достоверность результатов проводимых измерений. Согласно описанным выше стандартам, можно провести параллели между параметром точности в поверке КИП и характеристикой качества как соответствие установленным нормам и требованиям. Таким образом, определяемая точность поверяемых измерительных приборов относится к понятию качества проведения поверки устройств. Из этого следует, что параметр погрешности является ключевым во влиянии на качественные показатели аттестации, снижение данных показателей является ключевым условием при проведении автоматизации технологического процесса проведения поверки КИП.

Проблемы и решение автоматизации поверки электрических КИП

На данный момент одной из главных проблем автоматизации является фиксация данных с электрических КИП, не имеющих информационной связи с вычислительной аппаратурой. Согласно исследованиям и разработкам ученых и инженеров, а также благодаря развитию и активному использованию цифровых технологий, для данного аспекта автоматизации предлагается применение технологии технического зрения. В качестве аппаратуры фиксации значений с измерительного устройства (ИУ) подразумевается использование камеры, в программной части используются технологии нейронных сетей, обеспечивающие обработку изображения экрана исследуемого прибора. Главная задача системы анализа заключается в фиксации информации с циферблата электрических КИП.

Для анализа цифровых ИУ применяются технологии нейронных сетей оптического рас-

познавания символов, например, pytesseract. Задача системы сводится к анализу изображения, определению текстовой и числовой информации в цифровой текст, с которым возможно обеспечивать дальнейшее взаимодействие, анализ и обработку [6]. Стоит отметить, что существует довольно большое разнообразие данного рода систем оптического распознавания символов. Например, на среде языка python присутствуют такие библиотеки, как pyocr, ocrodjvu, tesserocr. Для Javascript существуют ocracy, gocr.js, ocrad.js, tesseract.js, node-tesseract-ocr, node-tesseract. И еще многое число библиотек, при этом стоит отметить, что такие наборы так или иначе основаны на tesseract, являющейся механизмом распознавания текста. Достоинством таких систем, несомненно, является перевод текста из формата изображения в цифровой формат текста. К недостаткам же стоит отнести возможность проявления ошибки распознавания значений, некорректного определения цифр, символов или букв.

Несмотря на существование цифровых ИУ, в том числе с возможностью обмена данными с цифровыми системами и персональными компьютерами, на сегодняшний момент спросом также пользуются стрелочные устройства. В данном контексте, задача осложняется необходимостью сопоставления отклонения стрелки КИП со значениями проградуированной шкалы циферблата устройства. Решением данной проблемы также является использование технологии нейронных сетей, применяющих систему оптического сопоставления циферблата устройства с заранее заготовленной в библиотеке маской. При совпадении библиотечного изображения и фото экрана КИП устанавливается значение отображаемой тестируемым прибором. Достоинством такой системы является скорость работы ввиду небольшого набора фиксируемых значений и в целом возможность фиксации значений со стрелочных КИП. Главными недостатками таких систем являются необходимость подстраивания программы под определенные задачи и устройства, тем самым расширяя библиотеку анализируемых приборов, а также невозможность точного определения параметрам погрешности устройства. При этом стоит понимать, что существует необходимость устанавливать на каждый прибор несколько определенных значений, соответствующих заданных оператором в библиотеке маскам. Также к недостаткам стоит отнести ограниченность фиксируемых значений, вероятность ошибки определения отображаемого значения ИУ, необходимость дообучения нейронной сети в случае тестирования нового прибора, а также замедление работы алгоритма вследствие увеличения библиотеки масок исследуемых устройств.

В случае с цифровыми КИП устаналивается необходимость дообучения нейронной сети для распознавания максимально широкого диапазона цифр, различных стилей написания. Возможно вовсе написание новой программы, решающей данную задачу, что на сегодняшний день не является настолько сложным решением. Обработка значений стрелочных КИП относится к более сложной задаче, поскольку рассматриваемая модель сопоставления масок не способна обеспечить необходимый уровень качества тестирования. Такая программа не способна определить точность тестируемого прибора, функционал ограничивается соответствием и несоответствием изображения и маски в библиотеке. Стоит отметить, что существуют разработки универсальных алгоритмов, определяющих с высоким показателем точности любое значение стрелочного КИП. Авторы программы «Определения показаний аналоговой шкалы контрольно-измерительных приборов, считанных машинным зрением» предлагают решение данной задачи путем обработки координат точек пересечения индикационной стрелки и оси шкалы, а также близколежащих к ней пронумерованных отмеченных значений, для точного определения показаний ИУ. При этом возможна обработка различного рода шкал, в том числе логарифмических [7]. Качество фиксации значений зависит от условий фиксации изображения циферблата электрического КИП, таких как освещение и угол наклона камеры [8].

Нормальные условия измерений при поверке

Проведение поверочных мероприятий электрических КИП проводится согласно требованиям, предписываемым в стандарте ГОСТ 8.395-80 «Нормальные условия измерений при поверке» [9]. Существует большое количество стандартов на проведение поверочных мероприятий, но для автоматизированной аттестации стандарты и предписываемые условия в существующих ГОСТах отсутствуют. Например, существует стандарт ГОСТ Р 8.959-2019 «Автоматические измерительные системы для контроля вредных промышленных выбросов. Методика поверки», в которых приводятся требования и формулы для проведения аттестации ИУ [10]. Первое, что стоит отметить, – ориентация данного документа на измерительные системы контроля вредных промышленных вы-

бросов, что никак не соответствует условиям проведения поверки электрических КИП. При этом в стандарте хоть и присутствуют требования к условиям проведения аттестации, нет никаких требований к автоматизированной поверке рассматриваемых систем.

В классических стандартах устанавливаются нормы для таких условий, как температура, атмосферное давление, относительная влажность, вибрация, магнитное поле [9]. При этом полностью отсутствуют требования к освещению циферблата устройства и углу наклона экрана. Данные условия необходимы для исключения таких погрешностей при поверке стрелочных КИП, как параллакса и интерполяции. Данные ошибки проявляются всегда и относятся к субъективному проявлению [10]. Погрешность интерполяции всегда проявляется при определении положения стрелки на шкале ИУ, между двумя соседними делениями. Эта ошибка составляет (±0,2–0,1) % от величины деления, в пределах которого измеряются метрологические показания средства измерения [11]. Цифровые приборы также обладают подобным отклонением, известным как погрешность квантования, с отличием в том, что в данном случае характер этой погрешности является несубъективным. Погрешность параллакса описывает искажение индикации значений величины, в результате неправильного угла обзора оператора, при фиксации измерительных данных.

Дополнение нормальных условий поверки в рамках автоматизации

Применение технического зрения помогает исключить данные погрешности. Стоит отметить, что ошибка интерполяции, при условии применения алгоритмов обработки изображения, будет полностью исключена, по причине точной опоры на математический аппарат при вычислениях и отсутствия субъективности. Для исключения погрешности параллакса необходимо установить камеру строго параллельно, во всех плоскостях, с центром начала стрелки циферблата прибора.

Для оператора стандартами не предусмотрены правила, устанавливающие критерии освещения циферблата КИП, поскольку подразумевается, что рабочее место будет освещено согласно ГОСТ Р 55710-2013 «Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений». В данном стандарте описываются нормы освещенности рабочего пространства, насыщенность света пространства, уровень яркости и способы регулировки данного параметра, нормы отражения освещения и т. п. [12]. В условиях автоматизации, путем внедрения технологии технического зрения, нормы освещенности не установлены.

Стоит определиться, что необходимость такого параметра присутствует, что подтверждается опытным путем. На рис. 1–9 приведены изображения циферблата часов при разном рас-

Рис. 1. Направление освещения лампы выше циферблата прибора на расстоянии 10, 20 и 30 см от экрана

Рис. 2. Направление освещения лампы ниже циферблата прибора на расстоянии 10, 20 и 30 см от экрана

Рис. 3. Направление освещения лампы прямо на циферблат прибора на расстоянии 10, 20 и 30 см от экрана

стоянии, экрана от источника освещения, положении и типе данного источника. На рис. 1–3 показаны изображения экрана часов, циферблат устройства состоит из пластика, освещенные светодиодной лампой с рассеивателем с показателем цветовой температуры светового потока в 4000 К, нейтральное.

На рис. 4–6 показаны изображения экрана, освещенные люминесцентной лампой с рассеивателем с показателем цветовой температуры светового потока в 2700 К, ближе к теплому белому или рассвету/закату.

На рис. 7–9 приведены изображения экрана, освещенные лампой накаливания с показателем цветовой температуры светового потока в 2700 К, ближе к теплому белому или рассвету/закату, как и в случае люминесцентной.

Визуально, наиболее четко видно значения циферблата часов на рис. 1, при освещении экрана светодиодной лампой с рассеивателем и пока-

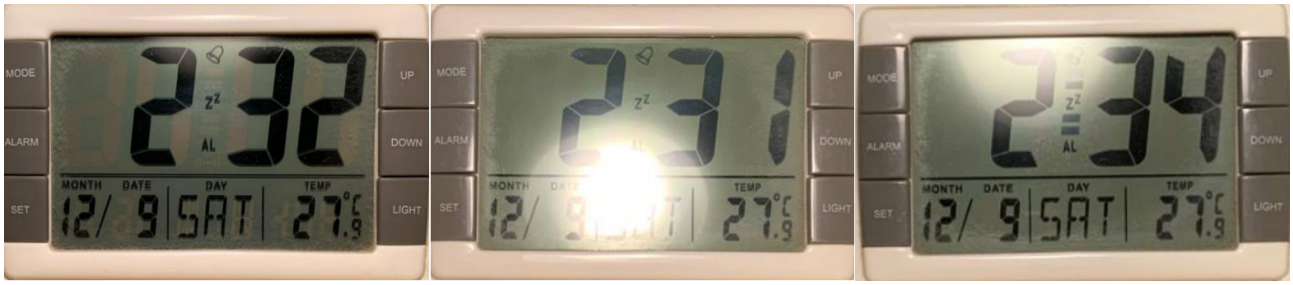


Рис. 4. Направление освещения лампы выше циферблата прибора на расстоянии 10, 20 и 30 см от экрана

Рис. 5. Направление освещения лампы ниже циферблата прибора на расстоянии 10, 20 и 30 см от экрана

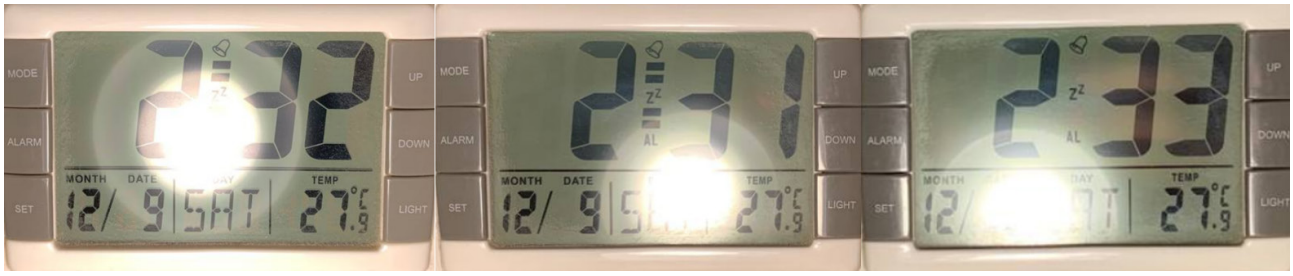


Рис. 6. Направление освещения лампы прямо на циферблат прибора на расстоянии 10, 20 и 30 см от экрана

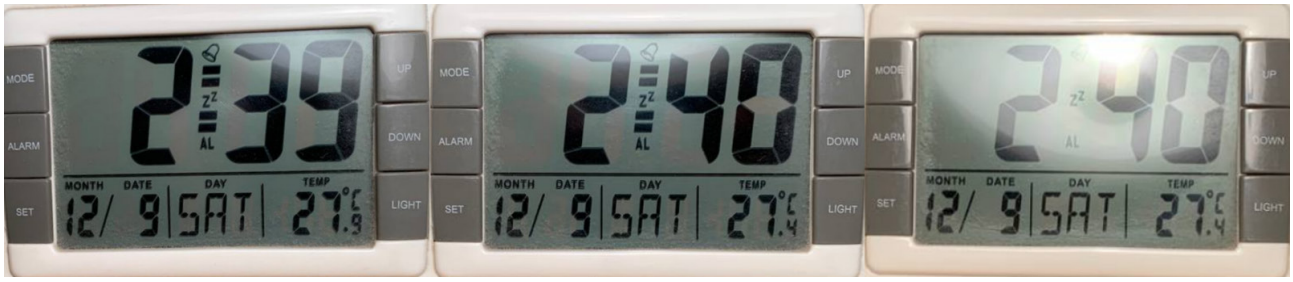


Рис. 7. Направление освещения лампы выше циферблата прибора на расстоянии 10, 20 и 30 см от экрана

Рис. 8. Направление освещения лампы ниже циферблата прибора на расстоянии 10, 20 и 30 см от экрана

Рис. 9. Направление освещения лампы прямо на циферблат прибора на расстоянии 10, 20 и 30 см от экрана

зателем цветовой температуры светового потока в 4000 К на расстоянии 10 см и направлении освещения выше часов. Во всех остальных случаях на экранах прибора видно отражение свечения лампы. Стоит отметить, что во всех случаях прямое направление освещения полностью засвечивает значения экрана. В случае люминесцентной лампы при направлении освещения ниже циферблата небольшой засвет проявляется исключительно при расстоянии, от экрана до источника света, в 10 см. Стоит отметить, что при этом освещение циферблата является довольно тусклым. При освещении лампой накаливания, так или иначе сама лампа отражается в экране часов. Переведя изображение в черно-белый формат, возможно отчетливо увидеть, как именно система технического зрения «видит» информацию с анализируемых изображений (рис. 10–12). Настройки черно-белой границы были выведены от значения 50 до 255.

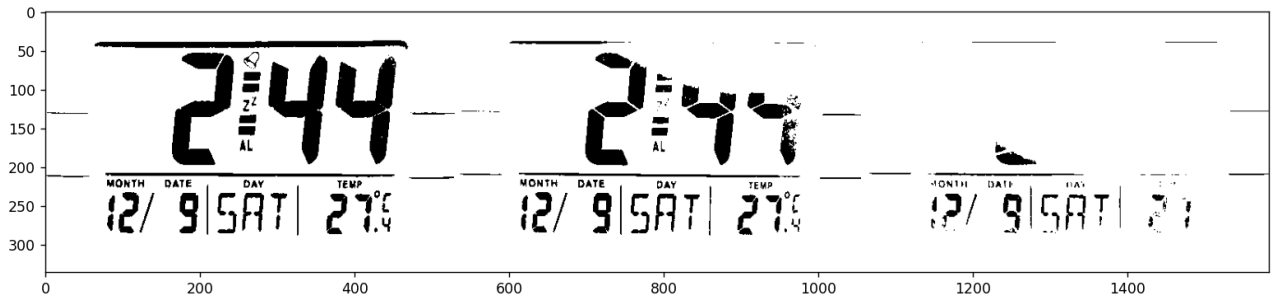


Рис. 10. Светодиодное освещение выше экрана прибора на расстоянии 10, 20 и 30 см от экрана

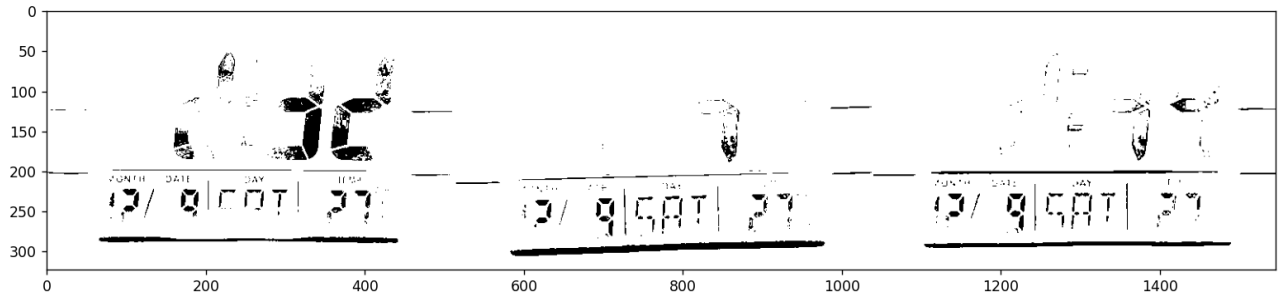


Рис. 11. Люминесцентное освещение экрана прибора на расстоянии 10, 20 и 30 см от экрана

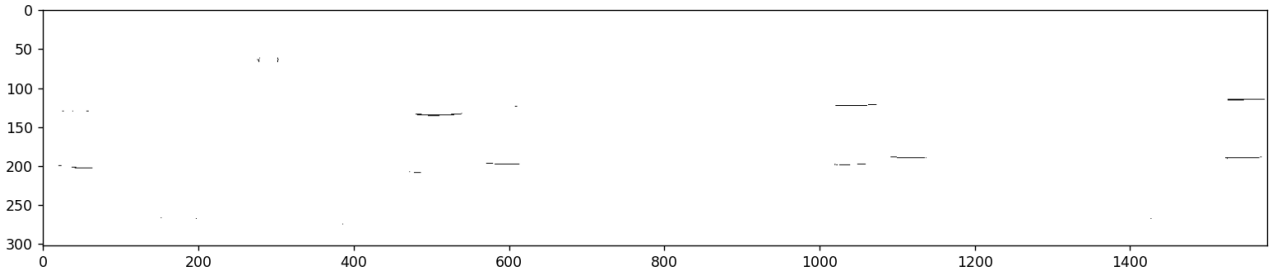


Рис. 12. Прямое направление освещения экрана прибора на расстоянии 10, 20 и 30 см от экрана

После обработки четко видны значения при освещении выше экрана светодиодной лампой на расстоянии 10 см. При люминесцентном освещении невозможно распознать визуально значения с экрана, как и при прямом освещении. Стоит отметить, что наиболее устойчивым оказалось изображение, где экран был освещен светодиодной лампой в 10 см от экрана. Диапазон нижнего порога мог изменяться от 20 до 90, что дает возможность производить регулировку обработки изображения программно. Возвращаясь к люминесцентному освещению, стоит отметить, что при направлении освещения лампы ниже циферблата прибора на расстоянии 10, 20 и 30 см от экрана данный тип подсветки экрана являлся достаточно устойчивым к обработке, несмотря на незначительное отражение лампы на экране. При этом диапазон нижнего порога черно-белого составлял от 75 до 100–110, но возможно было рассмотреть значения при различном расстоянии от экрана до источника освещения. Прямое освещение вовсе не представляло возможным рассмотреть значение циферблата при обработке изображения.

Заключение

Автоматизация процедуры поверки сопровождается соблюдением установленных требований аттестации стандартами на тестирование КИП. Соответствие данным требованиям определяет такой параметр, как качество проведенной аттестации. В настоящих требованиях используемых для установления норм проведения аттестации, отсутствует такой параметр, как освещение экрана циферблата. Данное решение связано с ручным проведением поверки электрических КИП в контексте автоматизации, при применении технологии технического зрения, дополнения к требованиям отсутствуют. Исследования, проводимые нами, показали, что параметр освещения экрана циферблата ИУ является важным и даже одним из ключевых параметров для автоматизированной аттестации приборов. Ключевыми параметрами являются тип освещения, направление светового потока, расстояние от экрана до источника света. При этом стоит помнить, что многие алгоритмы обработки изображения могут преобразовывать фотографию в черно-белый формат, для упрощения дальнейшей обработки. Именно поэтому для сохранения как можно большего количества информации с изображения, на сегодня существует необходимость определения норм освещения. Из результатов опытов и исследования видно, что светодиодное освещение лучше подходит для освещения экрана КИП. Данный факт обусловлен возможностью регулировки светового потока через драйвер и максимально широкого диапазона регулировки порога черно-белого для обработки изображения. При этом стоит отметить направление освещения, полностью исключается прямое направление освещения лампой на экран прибора, при этом освещение сверху показывает наиболее высокое по сте-

пени освещения и устойчивое к обработке изображение. При этом освещение снизу также возможно. Комбинацией регулировки параметров светового потока, порога обработки изображения, а также направления освещения возможно добиться изображения экрана, тестируемого КИП, с сохранением максимального количества информации на изображении. Дальнейшие исследования направления освещения и обработки необходимы для построения информационной модели управления параметрами среды для качественной автоматической обработки изображения экрана тестируемых ИУ.

Список источников

1. *Клокотов И. Ю.* Автоматизация технологических процессов. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-tehnologicheskih-protsessov/viewer (дата обращения: 15.09.2023).

2. *Смышляева А. А., Резникова К. М., Савченко Д. В.* Современные технологии в Индустрии 4.0 – киберфизические системы. URL: https://resources.today/PDF/02INOR320.pdf?ysclid=lmjqg2xgqp580993637 (дата обращения: 28.08.2023).

3. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. URL: https://www.testprom.ru/img_user/gosts/01/040/gost_15467-79.pdf (дата обращения: 30.09.2023).

4. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. URL: https://rustestm.ru/wp-content/uploads/2021/10/gost-r-iso-9000-2015-sistemy-menedzhmenta-kachestva-osnovnye-polozheniya-i-slovar.pdf (дата обращения: 05.10.2023).

5. *Войнова Н. Ф.* Современное состояние теории, средств и методов автоматизации технологических процессов сельскохозяйственного производства // Вестн. ВИЭСХ. 2014. № 2 (15). С. 64–67.

6. *Голубничий А. А.* К вопросу об использовании технологии tesseract для построения систем оптического распознавания символов с нелатинскими алфавитами. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ob-ispolzovanii-tehnologii-tesseract-dlya-postroeniya-sistem-opticheskogo-raspoznavaniya-simvolov-s-nelatinskimi (дата обращения: 15.10.2023).

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для электронной вычислительной машины № 2023618519. Программа определения показаний аналоговой шкалы контрольно-измерительных приборов, считанных машинным зрением / Соленый С. В., Бобрышов А. П., Кузьменко В. П., Создателева М. Э. Заявл. 26.04.2023.

8. Бобрышов, А. П., Соленый С. В. Исследование проблем использования технологии компьютерного зрения при осуществлении поверки контрольно-измерительных приборов // Наука молодых. 2022. № 3. С. 61–69.

9. ГОСТ 8.395-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования. URL: https://ohranatruda.ru/upload/iblock/366/4294821960.pdf (дата обращения: 12.10.2023).

10. *Burmistrov V. V.* Brief error theory. 2008.P. 11–12.

11. Metrological support of production in mechanical engineering. 2017. P. 76–79.

12. ГОСТ Р 55710-2013. Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200105707 (дата обращения: 11.10.2023).

УДК 567.43 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-190-193**

В. А. Голубков*
кандидат технических наук, доцент
Е. Ю. Ватаева*
старший преподаватель
А. Г. Федоренко*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МОДЕЛЬ ВИБРАЦИИ ОДНОСТУПЕНЧАТОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ

Приводится математическое описание погрешностей изготовления колес, приведенное к шагу зацепления. Составлены дифференциальные уравнения колебаний зубчатых колес с учетом переменной жесткости зубчатого зацепления, упругости опор и дефектов подшипников.
Ключевые слова: *погрешность изготовления колес, зубчатое колесо, шаг зацепления, упругость опор, дефект подшипников.*

V. A. Golubkov*
PhD, Tech., Associate Professor
E. Yu. Vataeva*
Senior Lecturer
A. G. Fedorenko*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE VIBRATION MODEL OF SINGLE GEAR TRANSMISSION

The article provides a mathematical description of wheel manufacturing errors, reduced to the meshing pitch. Differential equations for vibrations of gear wheels have been compiled, taking into account the variable rigidity of the gearing, the elasticity of the supports and bearing defects.
Keywords: *wheel manufacturing error, gear, meshing pitch, elasticity of supports, bearing defect.*

Установленные в упругие опоры шестерня и колесо составляют зубчатую передачу. Колесо вращается с угловой скоростью. Роль пружин выполняют зубья, через которые осуществляется взаимодействие шестерни и колеса.

Реальные зубчатые передачи выполнены со следующими технологическими погрешностями:

– центры тяжести шестерни и колеса не совпадают с центрами основных окружностей и обуславливают дисбаланс вращающихся деталей;

– опоры качения выполнены с дефектами, в результате чего испытывают переменную нагрузку, что также приводит к изменению жесткости, которая в зависимости от числа нагруженных шариков опор является величиной переменной от времени;

– в результате пересопряжения зубьев и профильных погрешностей жесткость зацепления также подвергается изменениям;

– ошибки основного шага и деформации зубьев приводят к соударениям при входе зубьев в зацеплении.

Все эти причины являются источниками вибрации прямозубой передачи и должны быть учтены при составлении уравнений движения.

В работах [1–3] авторами предложены схемы расчета одноступенчатых зубчатых передач с учетом упругих опор. В качестве источников вибрации в данных работах рассмотрены погрешности зацепления, переменная жесткость зацепления и удары при входе зубьев в зацепление, т. е. в основном высокочастотные возмущения.

Уравнения колебаний, предложенные авторами [2, 3], представляют собой системы дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами и линейным демпфированием, и в общем виде не исследуются.

В работе [3] решается задача в общем виде в предположении, что жесткости опор и зацепления являются величинами постоянными, возбуждение передачи происходит только за счет погрешности зацепления.

В исследовании [4] найдено периодическое решение системы для идеально точных пере-

дач, у которых жесткость двупарного зацепления вдове больше жесткости однопарного зацепления и является ступенчатой функцией времени.

В перечисленных работах не исследовано совместное влияние как погрешности зацепления, так и переменной жесткости передачи на колебание зубчатой передачи. Кроме того, не учтено наличие дисбаланса колес и возмущений, вызванных дефектами опор, поэтому предлагается модель вибрации зубчатой передачи, учитывающая перечисленные факторы.

В качестве обобщенных координат рассматриваемой системы примем: φ_1, φ_2 – угловые перемещения шестерни и колеса; y_1, y_2 – поступательные перемещений шестерни и колеса.

За положительное направление отсчета примем: для угловых перемещений против часовой стрелки, для поступательных – вверх. Демпфированием в опорах качения и зубчатом зацеплении пренебрегаем.

Таким образом, мы имеем 2-массовую систему с четырьмя степенями свободы.

Кинематическая энергия этой системы для плоского движения запишется:

$$T = \frac{1}{2} m_1 \left[\left(y_1 + e_1 \cos\varphi_1 \right)_t^{'} \right]^2 + \\ + \frac{1}{2} m_2 \left[\left(y_2 + e_2 \cos\varphi_2 \right)_t^{'} \right]^2 + \frac{1}{2} y_1 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} y_2 \dot{\varphi}_2^2.$$

Потенциальная энергия деформации опор, зацепления и относительного положения статического равновесия запишется в виде:

$$\Pi = \frac{1}{2} C_{y1}(t) y_1^2 + \frac{1}{2} C_{y2}(t) y_2^2 + \frac{1}{2} C_x(t) x^2 + W(x,t),$$

где m_1, m_2, J_1, J_2 – массы и моменты инерции шестерни и колеса; e_1, e_2 – статические дисбалансы шестерни и колеса; $C_{y1}(t), C_{y2}(t), e_x(t)$ – переменные жесткости опор и зацепления; x – деформация зацепления.

Запишем уравнение движения в безразмерных параметрах:

$$\bar{m}_{1,2} = \frac{m_{1(2)}}{m_0}; \bar{J}_{1(2)} = \frac{J_{1(2)}}{m_0}; \bar{c}_{y,x} = \frac{c}{m_0 w_0^2};$$

$$\bar{\dot{\varphi}}_{1,2} = \frac{\dot{\varphi}}{w_0}; \bar{\ddot{\varphi}}_{1,2} = \frac{\ddot{\varphi}}{w_0^2}; \bar{F} = \frac{F}{m_0 l_0 w_0^2};$$

$$\bar{M}_{T(дв)} = \frac{M_{T(дв)}}{m_0 l_0^2 w_0^2}; \bar{r}_{1,2} = \frac{r}{l_0},$$

где $m_0 l_0 w_0$ – характерные параметры системы, например, $m_0 = m_1; l_0 = r_1; w_0 = \frac{\pi n}{30}$; n – скорость вращения ведущего колеса.

Аналогично, полученные величины:

$\bar{e}_{1,2} = \frac{e}{l_0} \ll 1$ – так как эксцентриситет колес мал по сравнению с характерными размерами;

$\begin{cases} \bar{y}_{1,2} = \frac{y}{l_0} \ll 1 \\ \bar{x} = \frac{x}{l_0} \ll 1 \end{cases}$ – исследуем малые по сравнению с характерными размерами перемещения.

Будем полагать также, что

$$\bar{\dot{y}}_{1(2)} = \frac{\dot{y}}{e_0 w_0} \ll 1; \bar{\ddot{y}}_{1,2} = \frac{\dot{y}}{e_0 w_0^2} \ll 1.$$

Тогда, отбрасывая величины второго порядка малости, получим уравнения движения зубчатой передачи:

$$\bar{m}_1 \bar{\ddot{y}}_1 - \bar{e}_1 \bar{\dot{\varphi}}_1^2 \cos\varphi_1 + \bar{e}_1 \bar{\ddot{\varphi}}_1 \sin\varphi_1 + \\ + \bar{c}_{y1}(t) \bar{y}_1 + c_k(t) \bar{x} - \bar{F}(t) = 0,$$

$$\bar{m}_2 \bar{\ddot{y}}_2 - \bar{e}_2 \bar{\dot{\varphi}}_2^2 \cos\varphi_2 + \bar{e}_2 \bar{\ddot{\varphi}}_2 \sin\varphi_2 + \\ + \bar{c}_{y2}(t) \bar{y}_2 - \left(c_k(t) \bar{x} - \bar{F}(t) \right) = 0,$$

$$\bar{J}_1 \bar{\ddot{\varphi}}_1 + \bar{r}_1 \left[\bar{c}_x(t) \bar{x} - \bar{F}(t) \right] = \bar{M}_{дв}(t),$$

$$\bar{J}_2 \bar{\ddot{\varphi}}_2 + \bar{r}_2 \left[\bar{c}_x(t) \bar{x} - \bar{F}(t) \right] = \bar{M}_T(t),$$

где $\frac{\partial W}{\partial y_1} = -F(t); \frac{\partial W}{\partial y_2} = F(t); \frac{\partial W}{\partial \varphi_1} = -r_1 F(t);$

$\frac{\partial W}{\partial \varphi_2} = -r_2 F(t)$; $M_{дв}(t)$ – момент, передаваемый на ведущее колесо; $M_T(t)$ – тормозящий момент.

В идеальном случае шестерня вращается с постоянной угловой скоростью $w_1 = \frac{\pi n}{30}$. Однако из-за непостоянства подаваемого момента, а также погрешностей изготовления будем полагать, что тогда $\bar{\dot{\varphi}}_1 \approx 1; \bar{\ddot{\varphi}}_1 = \bar{\ddot{\varphi}} \ll 1$.

Аналогично,

$$\varphi_2 = w_2 t + \tilde{\varphi}_2(t); \quad \dot{\varphi}_2 = w_2 + \tilde{\dot{\varphi}}_2;$$

$$\tilde{\varphi}_2 = \frac{w_2}{w_1} + \bar{\tilde{\varphi}}_2 \approx \frac{w_2}{w_1}; \quad \bar{\ddot{\varphi}}_2 = \bar{\ddot{\tilde{\varphi}}}_2 \ll 1,$$

Учитывая эти соотношения, получим:

$$\begin{cases} \bar{m}_1\ddot{\bar{y}}_1 - \bar{e}_1\cos w_1 t + \bar{C}_{y1}(t)\bar{y}_1 + C_x(t)\bar{x} - \bar{F}(t) = 0, \\ \bar{m}_2\ddot{\bar{y}}_2 - \bar{e}_2\left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2\cos w_2 t + \\ + \bar{C}_{y2}(t)\bar{y}_1 - \left(C_x(t)\bar{x} - \bar{F}(t)\right) = 0, \\ \bar{J}_1\ddot{\bar{\varphi}}_1 + \bar{r}_1\left(C_x(t)\bar{x} + \bar{F}(t)\right) = \bar{M}_{\text{дв}}(t), \\ \bar{J}_2\ddot{\bar{\varphi}}_2 + \bar{r}_2\left(\bar{C}_x(t)\bar{x} + \bar{F}(t)\right) = \bar{M}_T(t). \end{cases}$$

Согласно [4, 5], а также учитывая, что $\frac{w_2}{w_1} = -\frac{\dot{r}_1}{r_2}$, получим:

$$\begin{cases} \bar{m}_1\ddot{\bar{y}}_1 + \bar{C}_{01}\bar{y}_1 + C_x(t)\bar{x} = \\ = \sum_{k=2}^{\infty}\bar{F}_{1K}\cos\left(w_{1K}t + \psi_{1K}\right) + \bar{F}(t) + \bar{e}_1\cos w_1 t; \\ \bar{m}_2\ddot{\bar{y}}_2 + \bar{C}_{02}\bar{y}_2 + C_x(t)\bar{x} = \sum_{k=2}^{\infty}\bar{F}_{2K}\cos\left(w_{2K}t + \psi_{2K}\right) - \\ -\bar{F}(t) + \bar{e}_2\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\cos w_1\frac{r_1}{r_2}; \\ \bar{J}_1\ddot{\bar{\varphi}}_1 + \bar{r}_1 C_x(t)\bar{x} = \bar{M}_{\partial в}(t) - \bar{r}_1\bar{F}(t), \\ \bar{J}_2\ddot{\bar{\varphi}}_2 + \bar{r}_2\bar{C}_x(t)\bar{x} = \bar{M}_T(t) - \bar{r}_2\bar{F}(t). \end{cases}$$

$$\bar{x} = \varphi_1 + \bar{y}_1 + \varphi_2\frac{r_2}{r_1} - \bar{y}_2 + \frac{\Delta(t)}{r_1} = \\ = \tilde{\varphi}_1 + \frac{r_2}{r_1}\tilde{\varphi}_2 + \bar{y}_1 - \bar{y}_2 + \bar{\Delta}(t)$$

где $\bar{\Delta}(t) = \frac{\Delta(t)}{r_1}$; $F_{1,2K}$ и $w_{1,2K}$ – амплитуды и возмущение силы, вызванные погрешностями подшипникового узла.

Функция погрешности зацепления является функцией ошибок изготовления профилей зубьев шестерни и колеса. Как правило, эти ошибки принимаются изменяющимися гармонически:

$$\Delta_L(t) = \alpha'_L\sin\left(w_1 t + \psi'_L\right) + \alpha''_L\sin\left(w_2 t + \psi''_L\right),$$

где L – номер пары зубьев, входящих в зацепление.

$$\Delta(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}\left(\Delta_L + \Delta_{L-1}\right) \\ \text{для } lT + \vartheta_L \le t \le \left(l + \varepsilon - 1\right)T + \vartheta_L, \\ \Delta_L \text{ для } \left(l + \varepsilon - 1\right)T + \vartheta_L \le t \le \left(l + 1\right)T + \vartheta_L. \end{cases}$$

Первое значение функция принимает при двунаправленном зацеплении, а второе – при однопарном направлении, где T – период времени поворота шестерни на угловой шаг; ε – коэффициент перекрытия, интервал двупарного перекрытия $T_2 = T\left(\varepsilon - 1\right)$, $\psi'_L, \psi''_L, \vartheta_L$ – случайные величины, характеризующие

$$C'' + \xi''_L \text{ при } lT + \vartheta_L \le t \le \left(l + \varepsilon - 1\right)T + \vartheta_L;$$

$$C_0(t) = C' + \xi'_L$$

$$\text{при } \left(l + \varepsilon - 1\right)T + \vartheta_L \le t \le \left(l + 1\right) + \vartheta_{L+1},$$

где C'' – жесткость двупарного зацепления; C' – жесткость однопарного зацепления; ξ''_L, ξ'_L – дополнительные изменения жесткости, вызванные ошибками изготовления зубчатых колес. Появление ненулевой нормальной составляющей относительной скорости зубьев в зацеплении вызывается ошибками в основном шаге и деформацией зубьев. В момент, когда зубья входят в зацепление, их нормальная относительная скорость становится нулевой. Функция, которая характеризует удар зубьев, представляет собой мгновенный абсолютно неупругий удар, при котором энергия относительного движения переходит в энергию совместных колебаний:

$$F(t) = \sum_{l=0}^{\infty}F_l\delta\left(t - lT + \vartheta_L\right),$$

$\delta\left(\tau\right)$ – дельта-функция, синхронизированная с моментами входа зубьев в зацепление;

$$F_L = \frac{J_1 J_2 \nu_1}{J_1 + J_2},$$

где J_1, J_2 – моменты инерции шестерни и колеса; ν_1 – нормальная относительная скорость соударяющихся зубьев.

Таким образом, приведенные в работе расчеты позволяют проанализировать влияние на динамику зубчатой передачи на линейные и угловые колебания различных факторов, таких как дисбаланс колес, погрешность опор, погрешность зацепления, соударение зубьев.

Список источников

1. О математическом моделировании колебаний прямозубых колес в связи с задачей их акустической диагностики / Ф. Я. Багицкий [и др.] // Акустическая

динамика машин и конструкций: сборник. М.: Наука, 1973.

2. *Гринкевич В. К.* Вынужденные колебания зубчатых колес одноступенчатого редуктора // Виброакустическая активность механизмов с зубчатыми передачами: сборник. М., Наука, 1971.

3. *Давыдов И. Ш.* Колебания одноступенчатой прямозубой передачи с упругими опорами // Известия высших учеб. завед. Машиностроение. 1966. Вып. 94.

4. Вибрации и шум электрических машин малой мощности / Л. К. Волков [и др.]. Л.: Энергия, 1979.

УДК 004.94 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-194-197**

В. Д. Косулин*
кандидат технических наук, доцент
И. А. Салова*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

КАЧЕСТВЕННО-ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ ПРИ СБОРКЕ МУФТЫ С РАДИАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ НА ЕЕ ПАРАМЕТРЫ

Представлены качественная и количественная оценки влияния погрешностей изготовления магнитной системы на параметры и работоспособность устройства.
Ключевые слова: *магнитное поле, магнитная муфта, моделирование, метод конечных элементов.*

V. D. Kosulin*
PhD, Tech., Associate Professor
I. A. Salova*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

QUALITATIVE AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF TECHNOLOGICAL DEVIATIONS IN THE ASSEMBLY OF A COUPLING WITH A RADIAL MAGNETIC SYSTEM ON ITS PARAMETERS

The article presents a qualitative and quantitative assessment of the influence of manufacturing errors of the magnetic system on the parameters and performance of the device.
Keywords: *magnetic field, magnetic coupling, modeling, finite element method.*

Магнитные муфты циркуляционных насосных систем, используемых в различных отраслях промышленности для перекачивания агрессивных и опасных для окружающей среды жидкостей, предназначены для передачи вращающего момента от приводного двигателя к рабочему колесу. В таких устройствах ведомая полумуфта, связанная с рабочим колесом, отделена от ведущей экраном, препятствующим утечке перекачиваемой субстанции, а момент, передаваемый муфтой, создается благодаря взаимодействию постоянных магнитов, конструктивно расположенных в обоймах [1, 2].

Магниты на основе редкоземельных металлов, благодаря высокой магнитной энергии, допускают значительные воздушные зазоры в магнитной цепи без существенного снижения передаваемого момента. Поэтому нормальная работа муфты как динамической системы во многом зависит от погрешностей взаимного расположения магнитных систем: их соосности, повторяемости размеров воздушного промежутка между постоянными магнитами обойм ведущей и ведомой полумуфт. Кроме того, в случае нарушения технологии при сборке магнитной системы возможны ситуации, приводящие к нарушению чередования полярности отдельных магнитов в готовой конструкции. При самом неблагоприятном сочетании указанных факторов вполне вероятно возникновение аварийных режимов при работе муфты в составе насосной системы.

В связи с этим представляет интерес как качественная, так и количественная оценка влияния погрешностей изготовления магнитной системы на параметры и работоспособность устройства.

Рассмотрим конструкцию муфты с радиальным расположением постоянных магнитов, магнитная система которой схематически показана на рис. 1. Примем число пар полюсов равным 8, а диаметр окружности по середине воздушного зазора – 90 мм. Постоянные магниты изготовлены из сплава SmCo марки YX-16 [3]

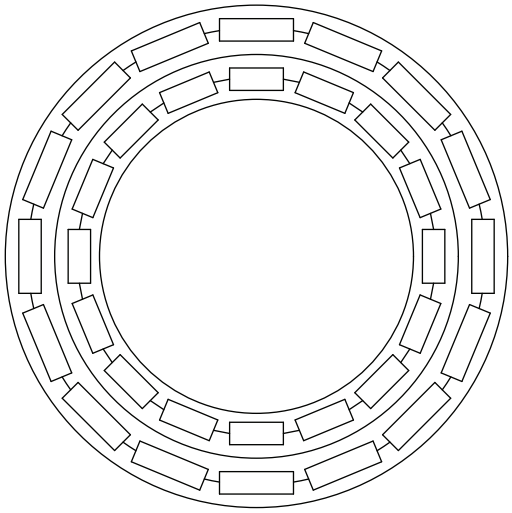


Рис. 1. Магнитная система муфты с радиальным расположением постоянных магнитов

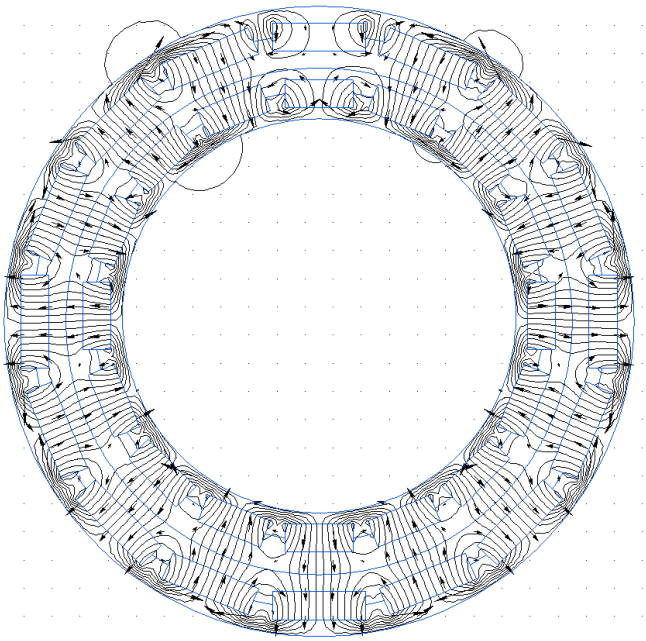


Рис. 2. Магнитная система с нарушением полярности одного магнита наружной обоймы (расположен вверху)

(с остаточной индукцией B_r=0,81÷0,8 5 Тл и коэрцитивной силой H_c=620÷660 кА/м) с размерами:

– магнит внутренней обоймы: 12×5×30 мм;

– магнит наружной обоймы: 16,5×5×30 мм.

Геометрия магнитной системы выбрана произвольно, безотносительно к какой-либо конкретной циркуляционной системе, поскольку нас, главным образом, интересует качественная картина влияния технологических погрешностей и возможных нарушений технологии изготовления на параметры муфты. Для анализа влияния различных факторов используется вычислительный эксперимент на основе метода конечных элементов в программном комплексе ELCUT [4]. Моделирование проводится с использованием задачи магнитостатики. При подготовке модели элементам задаются свойства материалов: *B*–*H*-кривая – для магнитопроводов, значение коэрцитивной силы – для магнитов, значения относительных магнитных проницаемостей – для магнитов, разделительного экрана и воздушного зазора. Коэрцитивная сила соседних магнитов направлена радиально и противоположно. Как было показано в работе [5], выбор материала магнитопроводов из совокупности применяемых электротехнических сталей не оказывает существенного влияния на основную характеристику магнитной муфты – величину удерживающего момента.

Сначала рассмотрим ситуацию, при которой соосность ведомой и ведущей полумуфт не нарушена, но один из постоянных магнитов, например, наружной обоймы, установлен с нарушением чередования полярности. Картина магнитного поля при нулевом сдвиге полумуфт (момент равен нулю) для 2D-анализа приведена на рис. 2, рассмотрение которой позволяет сделать ряд комментариев.

Неправильная установка постоянного магнита верхней обоймы фактически исключает из магнитной системы два магнита (один на внешней обойме и один на внутренней). При этом магнитный поток, проходящий через соседние с ними магниты, не раздваивается, как в «правильной» конструкции, а практически весь замыкается по наружному и внутреннему магнитопроводам со сторон, противоположных неправильно установленным магнитам, вызывая их дополнительное насыщение. Это приводит к снижению магнитной индукции в воздушном зазоре и развиваемого момента. Кроме того, при нагрузке (угловом смещении обойм друг относительно друга) пара с неправильно установленным магнитом создает момент, противоположный моменту, создаваемому остальными магнитами, что также приводит к снижению рабочего момента муфты.

Для принятой геометрии устройства снижение максимального момента составляет 13,3 % (16,13 Нм при нормальном расположении магнитов и 13,99 Нм при неправильно установленном). При этом муфта развивает номинальный момент, хоть и с меньшим запасом по перегрузочной способности, что в ряде случаев допусти-

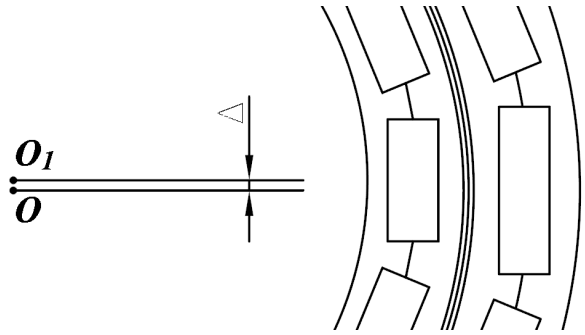


Рис. 3. Несоосность ведомой и ведущей полумуфт

мо. В том случае, если неправильно установлены несколько магнитов, снижение максимального момента может быть существенным, и муфта окажется неспособной обеспечить расчетный передаваемый момент. Поскольку при нарушении полярности части магнитов в собранной конструкции полумуфты относительно друг друга фиксируются, как в обычной конструкции благодаря остальным магнитам с «правильной» полярностью, подтверждением корректности сборки может служить измеренное на испытательном стенде значение максимального момента и сравнение его с расчетным значением при контроле отдела технического контроля (ОТК).

В процессе сборки магнитной системы могут возникнуть отклонения от расчетной величины воздушного зазора между соседними парами магнитов. Данные погрешности вызывают изменение магнитной индукции в рабочем зазоре, причем в каждой паре свои. Снижение ее или увеличение зависит от степени отклонения геометрии воздушного промежутка от проектной. Если речь идет об отклонениях, соизмеримых с полями принятых допусков, то изменение моментной характеристики муфты укладывается в погрешность расчета магнитной системы и заметного влияния на работу муфты не окажет.

Другое дело, когда в готовом устройстве по каким-либо причинам возникла несоосность ведомой и ведущей полумуфт (рис. 3).

Рассмотрим ситуацию, когда в муфте принятой геометрии имеет место несоосность Δ, а для выявления ее влияния на развиваемый момент зададимся рядом значений: 0,3; 0,5 и 1,0 мм. При этом положим, что муфта нагружена номинальным моментом, близким к половине от максимального значения, что соответствует смещению внутренней полумуфты относительно внешней на некоторый угол, который легко определяется по моментной характеристике (рис. 4).

В рабочем режиме при совместном вращении обеих полумуфт возникают пульсации момента, причиной которых является наличие эксцентриситета Δ и соответствующее изменение взаимного расположения магнитных систем в пределах одного оборота. Расчетные кривые изменения момента муфты для принятых значений Δ приведены на рис. 5, откуда следует, что пульсации достигают единиц процента от значения номинального момента. При определенном сочетании динамических характеристик элементов конструкции возможна ситуация развития резонансных явлений, которые могут привести к ее разрушению.

К технологическим нарушениям сборки магнитной системы можно отнести и такие, при которых возникает сдвиг ведущей полумуфты относительно ведомой вдоль оси вращения. При этом появляется осевое усилие, нагружающее подшипники. Очевидно, что с увеличением ко-

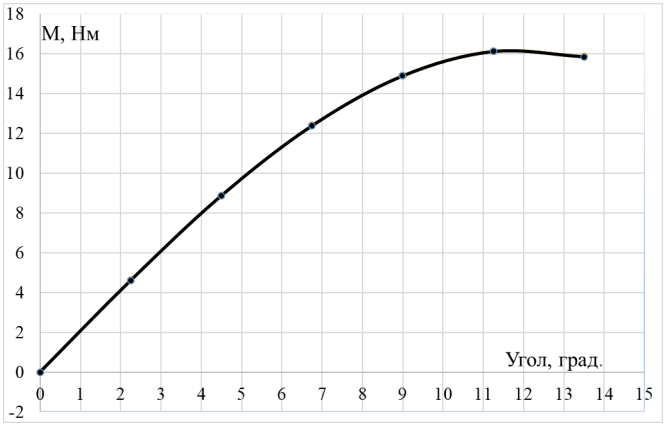


Рис. 4. Моментная характеристики магнитной муфты принятой геометрии

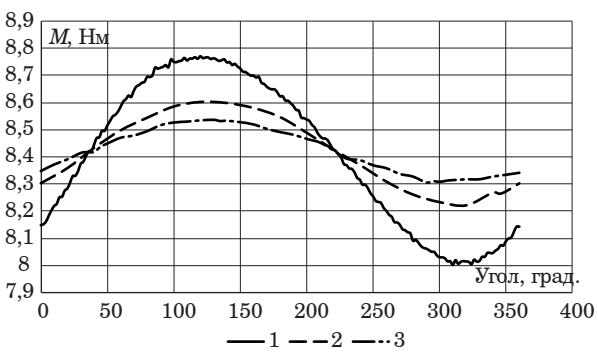


Рис. 5. Изменение момента муфты в пределах одного оборота при Δ=1,0 мм (1); Δ=0,5 мм (2); Δ=0,5 мм (3)

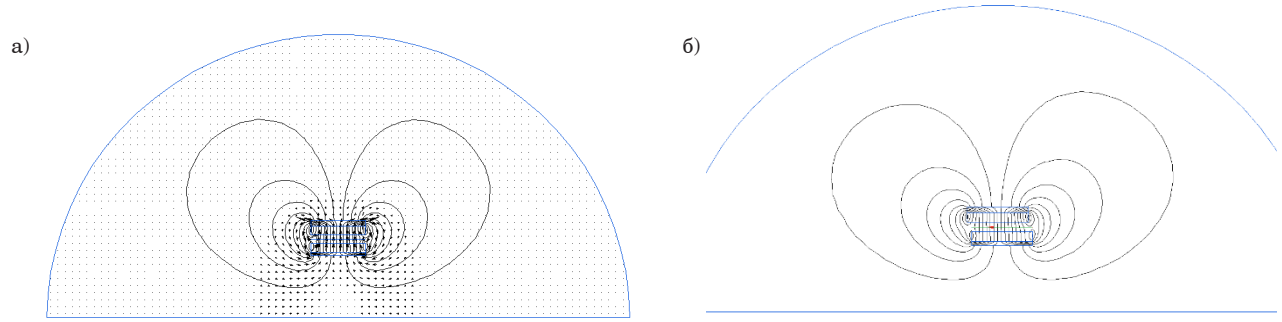


Рис. 6. Магнитное поле при согласованном положении магнитов (а) и наличии осевого относительного сдвига полумуфт (б)

личества магнитов в обойме даже малый сдвиг может привести к усилию, соизмеримому с усилием рабочего режима муфты (рис. 6).

Расчетные значения аксиальной силы при различных смещениях для муфты принятой геометрии приведены в таблице.

Значения сил при аксиальном смещении

Аксиальное смещение, мм	Аксиальная сила, Н
0	0,008
0,5	4,2544
0,75	6,4741
1	8,6013
2	17,2

В подобной ситуации возникает дополнительная нагрузка на подшипники, что приводит к быстрому их износу и соответствующему снижению надежности и срока службы всего устройства.

Выводы

1. Технологические погрешности изготовления элементов магнитной системы муфт, приводящие к неодинаковому воздушному зазору между полюсами постоянных магнитов в многополюсных конструкциях, оказывают влияние на величину максимального момента. Если степень нарушения геометрии находится в пределах, соизмеримых с полями допусков, то при выборе достаточного запаса по моменту при расчете параметров муфты заметного влияния на работоспособность устройства они не оказывают.

2. Нарушение чередования полярности магнитов приводит к снижению развиваемого момента, и при системных нарушениях технологии сборки (нарушение полярности нескольких магнитов) муфта может оказаться неспособной выполнить задачу передачи номинального расчетного момента. Для исключения этих ситуаций необходимо в состав контрольных операций ОТК ввести контроль максимального момента, развиваемого муфтой, на испытательном стенде.

3. При проектировании магнитных муфт необходимо уделять особое внимание обеспечению соосности ведущей и ведомой полумуфт, поскольку при неблагоприятном сочетании динамических параметров элементов конструкции возможно появление резонансных явлений, которые могут привести к нарушению работоспособности устройства.

4. Для исключения влияния технологических погрешностей сборки магнитной системы, приводящих к появлению осевого усилия между магнитами ведущей и ведомой полумуфт, можно рекомендовать использование радиально-упорных подшипников.

Список источников

1. Магнитная муфта: принцип работы, устройство, эксплуатация. URL: https://ytspumps.ru/info/articles/printsip-deystviya/magnitnaya-mufta-printsip-raboty-ustroystvo-ekspluatatsiya/ (дата обращения: 04.11.2023).

2. *Красильников А. Я.* Особенности использования магнитной муфты в конструкциях герметичных машин. Екатеринбург: УрФУ, 2012. 250 с.

3. Технические характеристики магнитов SmCo. URL: https://magnet-prof.ru/index.php/magnity-smco.html (дата обращения: 04.11.2023).

4. ELCUT v.6.3. Комплекс программ для моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач: руководство пользователя. СПб.: ТОР, 2016.

5. *Салова И. А.* К вопросу о точности моделирования удерживающего момента магнитной муфты методом конечных элементов // Завалишинские чтения – 23: сб. докл. XVIII Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике (СПб., 18–19 апр. 2023 г.). СПб.: ГУАП, 2023. С. 352–356. Doi: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-352-356.

УДК [007.52:681.58›5]:621.313.322-77 DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-198-202

С. Ю. Лач*
аспирант, ассистент
С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ВЫБОР ХОДОВОЙ ЧАСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Рассмотрена ходовая часть с колесами Мекана для роботизированной платформы диагностики турбогенераторов во время ремонта с выводом и без вывода ротора. Предварительно определены положительные и отрицательные качества использования данного типа колес. Описаны необходимые конструктивные особенности робота для передвижения в радиальном направлении по статору турбогенератора.
Ключевые слова: *электрические машины, генератор, ремонт, робототехническая система, колеса Мекана, всенаправленные колеса, автоматизация.*

S. Y. Lach*
PhD Student, Assistant
S. V. Solyonyj*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

CHOOSING THE CHASSIS OF A ROBOTIC TOOL FOR DIAGNOSING TURBOGENERATORS

The chassis with Mekana wheels for a robotic platform for diagnosing turbogenerators during repairs with and without rotor removal is considered. The positive and negative qualities of using this type of wheel have been preliminarily determined. The necessary design features of the robot for moving in the radial direction along the stator of the turbogenerator are described.
Keywords: *electrical machines, generator, repair, robotic system, Mekana wheels, omnidirectional wheels, automation.*

После разработки концепции, определения целей и задач робототехнического устройства необходимо перейти к рассмотрению тележки, которая будет переносить полезную нагрузку в рабочей области. Максимальная толщина данной тележки ограничена условием в 19 мм [1], соответственно, необходимо решить, как будет устроена ходовая часть для обеспечения компактности, проходимости и возможности переносить максимально возможный при этом полезный груз в виде измерительного оборудования.

Зарубежные производители подходят к решению данной проблемы различными способами. Робот *Toshiba*, например, оснащен двумя гусеничными устройствами, позволяющими ему передвигаться в прямом и обратном направлениях (рис. 1) [2].

Такое решение имеет как положительные, так и отрицательные стороны. При довольно огромном контакте с поверхностью приходится расплачиваться малой степенью подвижности и необходимостью дополнительного устройства, помогающего сменить траекторию движения робототехнического устройства. При этом масса полезной нагрузки сильно возрастает, но не играет особой роли при создании компактного устройства, так как оборудование, устанавливаемое на тележку, будет иметь незначительные габариты.

Компанией *Siemens* предложено комплексное решение для обеспечения мобильности робототехнического средства [3, 4]. Разработанный компанией робот оснащен колесной системой, находящейся на отдельных элементах, соединенных с телом, переносящим полезную нагрузку, шарнирной системой. Внешний вид робототехнического средства изображен на рис. 2.

Использование такой системы позволяет обеспечить легкое передвижение робота по радиальным поверхностям. При этом двигатели,

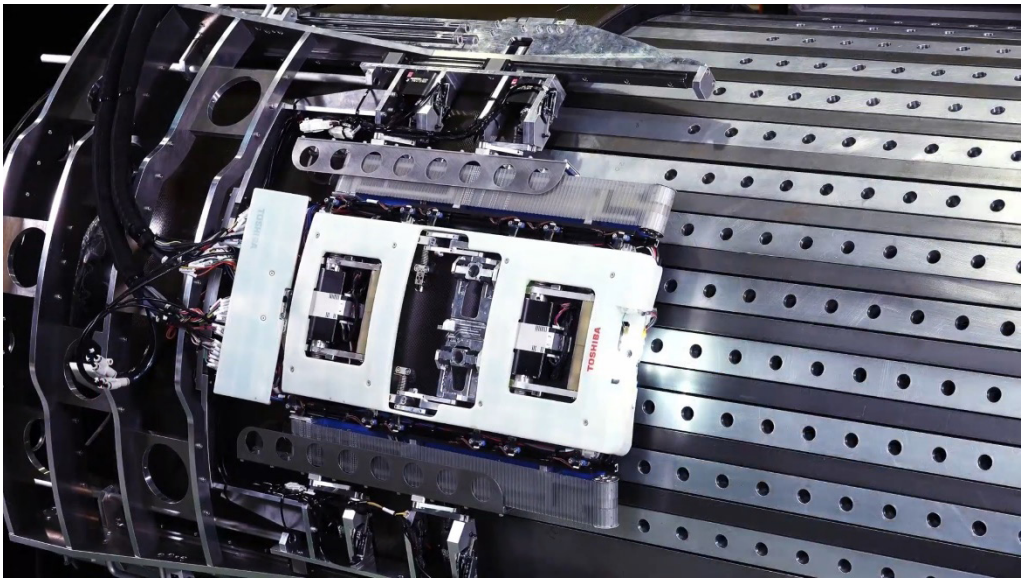


Рис. 1. Робот Toshiba со вспомогательной системой смены траектории

Рис. 2. Устройство ходовой части робота Siemens

отвечающие за вращение колес, а также система крепления к поверхности находятся в отдельных элементах, что упрощает ремонт или замену в случае неисправности, а также позволяет отдать большее пространство в основной части устройства под оснащение его дополнительными измерительными элементами.

Отрицательным качеством такой системы является сложная конструкция крепления ходовых элементов к базовому устройству.

Предлагается рассмотреть использование всенаправленных колес (колес Мекана) для обеспечения свободного передвижения робототехнического средства по расточке статора турбогенератора без необходимости установки дополнительных средств смены траектории направления (рис. 3).

Необходимо сразу оговориться, что использование ходовой части такого типа наложит некоторые ограничения в случае, если робототехническое устройство будет оснащено дублирующей кабельной системой для исключения шанса разрядки аккумулятора во время нахождения робота в зоне производства работ по диа-

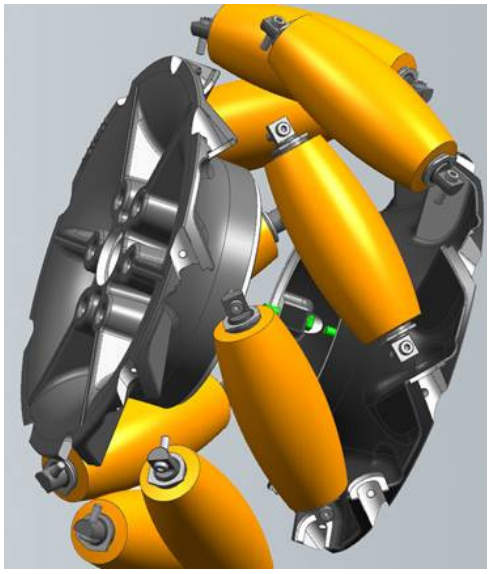


Рис. 3. Типовая схема колеса Мекана

гностике. Данную проблему будет необходимо решить в последующей работе.

Всенаправленные колеса легки в изготовлении, так как условно состоят из четверх основных элементов – двух несущих дисков, катки и втулки для их крепления. Ряд роликов размещен под углом вокруг периферии колеса. В стандартном случае ролики размещаются под углом 45° между осью роликов и центральной осью, но при необходимости этот угол можно менять.

Ролики имеют такую форму, что конечный силуэт колеса Мекана является круглым. При движении наклонные ролики выполняют преобразование части силы в направлении вращения колеса в силу, являющуюся перпендикулярной направлению вращения колеса. Вектор полной силы в любом желаемом направлении создается в зависимости от направления вращения и скорости каждого колеса. Скорость может быть разделена на составляющие активного и пассивного направления. Также данный тип колеса имеет три степени свободы, которые подразумевают:

– вращение самого колеса;

– вращение роликов;

– проскальзывание вокруг вертикальной оси, проходящей через точку контакта [5, 6].

Данную систему можно изготовить при помощи аддитивных технологий. При изготовлении катков необходимо подобрать материал, который не будет оказывать разрушающего воздействия на листы электротехнической стали, по которым в том числе будет осуществляться движение. Предлагается использовать резиновый материал, но потребуется провести экспериментальное исследование для определения прочностного запаса при износе покрытия. Замена катков не представляет большой сложности, но при частой необходимости в этом может возникнуть вопрос рентабельности использования данного типа ходовой.

Для увеличения полезной нагрузки при конструировании робототехнического устройства необходимо также рассмотреть расположение колес в отдельных конструктивных элементах по типу робота *Siemens*, так как это позволит увеличить место для расположения измерительного оборудования и предположительно уменьшит побочное влияние системы крепления на это оборудование. А именно влияние магнитного поля (при использовании магнитной системы зацепа) на измерительное оборудование. Так как различные схемы удержания робота в разных плоскостях еще необходимо рассмотреть в будущем, на данный момент принимается допущение об использовании магнитов.

Использование системы всенаправленных колес позволит выполнять перемещение робота вдоль пазовой зоны/зоны зубцов активной стали статора автоматически, так как отпадет необходимость в средствах смены траектории. Появится возможность при помощи искусственного интеллекта привязать смену зоны обследования к контрольным меткам каждого типа генераторов или же иным путем.

Переход на следующую зону измерения будет осуществляться благодаря схеме разнонаправленного вращения колес. А значит, схема управления станет проще, так как система не будет нуждаться в наличии рулевого аппарата. Типы и способы движения, которые могут использоваться для данного робототехнического устройства, показаны на рис. 4.

Смена направления движения будет происходить за счет управляющего импульса для двигателей, обеспечивающих движение.

При контроле передвижения с помощью ходовой камеры можно осуществлять обратную связь и исправлять траекторию движения робототехнического средства, изменяя направление вращения различных колес с минимальными затратами мощностей [7].

В сравнении со схемой с использованием гусеничных траков, всенаправленные колеса также являются более мобильной и простой в исполнении версией ходовой части. Так как при использовании гусеничного полотна передвижение вбок возможно, но существует риск сползания гусеницы с направляющего аппарата,

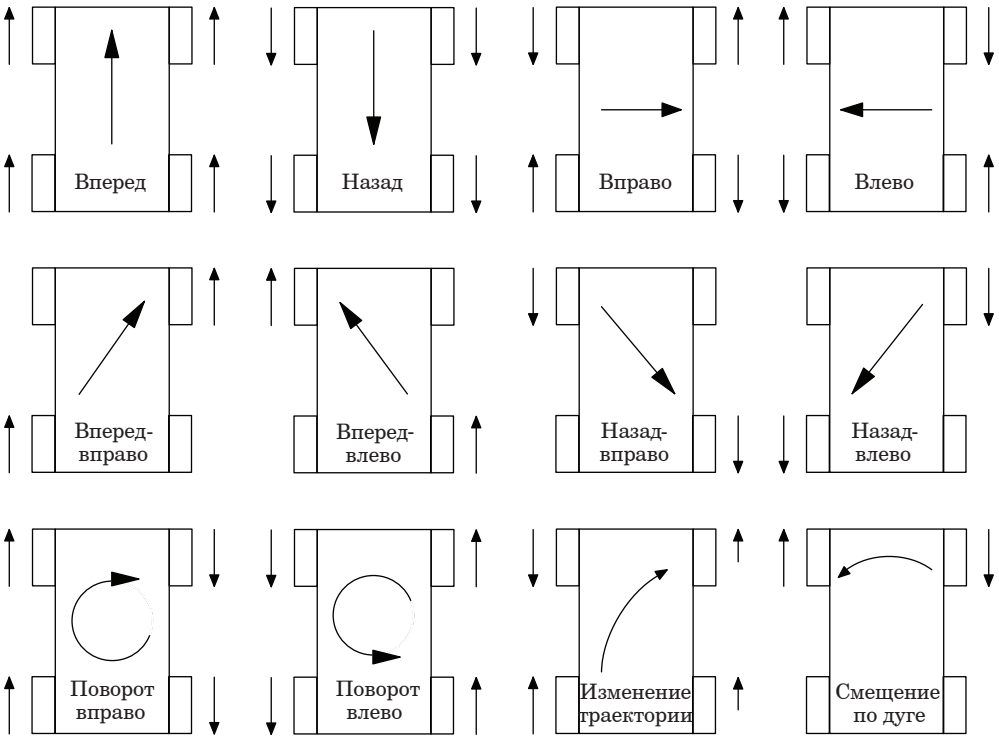


Рис. 4. Движение робототехнической платформы со всенаправленными колесами

что грозит потерей робототехнического средства в стесненном пространстве воздушного зазора электрической машины.

Также есть опасения и при использовании всенаправленных колес, так как при недостаточном креплении или расшатывании втулки, которая соединяет ролики с конструкцией несущих дисков, есть шанс вылета малых составных частей в расточку статора или попадания их в вентиляционные каналы ротора. Решить данную проблему можно использованием немагнитных частей при сборке колес Мекана или же проведением регулярного технического осмотра ходовой части робототехнической платформы перед проведением каждой серии испытаний.

Также данный тип всенаправленных колес может способствовать ускорению перемещения робота по рабочей поверхности по сравнению с гусеничной системой. На данном этапе это не требуется, но в будущем, при решении проблемы скорости обработки данных, получаемых с измерительных устройств, возможно также ускорить проведение испытаний, что должно благоприятно сказаться на общих сроках их проведения. Это, в свою очередь, является основной задачей роботизации диагностики турбогенераторов, наряду с повышением качества и обеспечением повторяемости измерений [8].

Таким образом, нами рассмотрены три схемы ходовой части робототехнического средства для диагностики турбогенераторов. Определены недостатки и положительные качества каждой схемы и колеса Мекана выбраны для проведения экспериментальных исследований.

Ходовая часть с использованием всенаправленных колес упростит схему управления робототехническим средством. Эта технология широко применяется для транспортных средств и роботов, действующих в зонах ограниченной мобильности. Учитывая, что пространство воздушного зазора турбогенератора составляет порядка 20 мм, а движение будет проходить по радиальной поверхности данный тип колес, теоретически, хорошо подходит для этой задачи. В будущем необходимо проверить данную гипотезу на практике, а также подобрать материал для катков, который позволит проводить техническое обслуживание роботизированного комплекса как можно реже.

Список источников

1. *Лач С. Ю., Соленый С. В.* Концепция робототехнической системы для диагностики электрических машин при ремонте и техническом обслуживании //

Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 3. С. 48–53. Doi: 10.31799/2949-0693-2023-3-48-53.

2. Toshiba energy systems & solutions (October 12, 2022). URL: https://www.global.toshiba/ww/news/energy/2022/10/news-20221012-01.html (дата обращения: 10.11.2023).

3. Aaron hand power plants deploy robots to inspect generators. URL: https://www.automationworld.com/factory/oee/news/13315139/power-plants-deploy-robots-to-inspect-generators (дата обращения: 10.11.2023).

4. *Savenkov M., Turner M.* New robotic technologies for inspecting two pole electric generators while the rotor remains in place // Journal of power and energy engineering. 2015. № 3. P. 123–127.

5. *Dickerson S. L., Lapin B. D.* Control of an omni-directional robotic vehicle with Mecanum wheels // National teleystems conference proceedings. Atlanta, USA, 1991. P. 323–328.

6. *Doroftei I., Grosu V., Spinu V.* Omnidirectional mobile robot – design and implementation". Bioinspiration and robotics: walking and climbing robots / eds by K. M. Habib. Vienna, Austria, 2007. P. 544.

7. *Лач С. Ю., Соленая О. Я.* Диагностика электрических машин при ремонте и техническом обслуживании с помощью робототехнических систем // Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики: электр. сб. материалов I Междунар. науч.-практ. конф. (Новополоцк, 2023). 2023. С. 218–221. EDN XBCDQZ.

8. *Sapre V., Savenkov M., Fischer R.* Advanced generator robotic monitoring – maximising availability // Minimising costs. proceedings of the 27th International congress of condition Monitoring and diagnostic engineering (Brisbane, 16–18 September 2014). 2014. P. 274–279.

УДК 621.315 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-203-211**

М. Я. Манин*
студент
О. Я. Солёная*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

В процессе эксплуатации высоковольтной электрической сети по воздушным линиям электропередач (ВЛЭП) осуществляется передача электрической энергии от источников питания к конечным потребителям. Поскольку данное электрооборудование находится на открытом воздухе, существует ряд факторов, которые могут влиять на эффективность его функционирования. Проведен анализ событий, провоцирующих появление аварийных режимов в электрических сетях высокого напряжения, представлены способы и средства борьбы с ними. Рассмотрены методы борьбы с гололедообразованием на ВЛЭП и способы обнаружения аварийных режимов в электрической сети. Проведен тепловой расчет проводов ВЛЭП.
Ключевые слова: *воздушная линия электропередачи, гололед, потери, электрическая сеть.*

M. Ya. Manin*
Student
O. Ya. Solenaya*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE EFFICIENCY OF OVERHEAD POWER LINES

During the operation of a high-voltage electrical network, overhead power lines (OHPLs) transmit electrical energy from power sources to end consumers. Since this electrical equipment is located outdoors, there are a number of factors that can affect its performance. An analysis of events that provoke the emergence of emergency conditions in high-voltage electrical networks has been carried out, and methods and means of combating them have been presented. Methods for combating ice formation on overhead power lines and methods for detecting emergency conditions in the electrical network are considered. Thermal calculations of overhead power transmission lines were carried out.
Keywords: *overhead power line, ice, losses, electrical network overhead power line.*

Введение

В настоящее время обеспечение электроснабжения потребителей должно быть бесперебойным, поскольку от этого зависит безопасность и жизнь людей. Как известно, электричество производится в пунктах источника выработки электроэнергии, а затем транспортируется к конечным потребителям с помощью специальных устройств для передачи электроэнергии – воздушными линиями электропередач (ВЛЭП). ВЛЭП конструктивно представляют собой систему из проводов, опор и изоляторов, с помощью которых выполняется транспортировка электрической энергии [1].

В процессе эксплуатации ВЛЭП порой присутствуют внешние факторы, которые могут негативно повлиять на положение и состояние воздушных линий. При наличии таких явлений оборудование может потерять свои свойства и должное функционирование, что, в конечном итоге, может привести к отключению линий электропередач. Основными факторами, которые могут повлечь за собой изменение функционирования воздушных линий электропередач, являются перепад температуры окружающей среды, атмосферные перенапряжения, скорость ветра, влажность воздуха, гололедные образования на проводах. Каждый отдельный фактор имеет свою степень влияния на функционирование воздушных линий электропередач. Чтобы такие события не масштабировались с последующим повреждением участка электрической сети, энергоснабжающим пред-

приятиям необходимо проводить организационные и технические мероприятия по локализации и отключению питания в месте повреждения.

Факторы, способствующие появлению аварийных режимов на ВЛЭП

Низкие и высокие температуры, окружающей ВЛЭП среды, а также их резкий перепад пагубно воздействуют на целостность проводов. При пониженной температуре уменьшается длина провода, что способствует увеличению допустимого тока нагрева, проходящего по проводникам. При повышении температуры провода увеличиваются в длине. Поражающим воздействием повышения температуры является отжиг провода, что ведет к снижению механической прочности. А при их перепаде может произойти деформация материала провода. Это ведет к разрушению целостности его конструкции.

Атмосферные перенапряжения характеризуются грозовыми явлениями. Именно из-за их воздействия возникают пробои изоляции и перекрытия, а иногда и серьезного повреждения или разрушения изоляции [2]. Перекрытие изоляции зачастую приводит к возникновению короткого замыкания.

Большие порывы ветра приводят к смещению проводов ЛЭП от их начального положения. Ветровое воздействие на провод сопровождается механическими колебаниями линий электропередач и способствует появлению пляски и вибрации проводов, которые оказывают дополнительную нагрузку на них и способствуют их постепенному разрушению в местах интенсивного перегиба и крепления к опоре.

Влажность воздуха также имеет негативные последствия. При наличии излишней влаги происходит интенсивное образование капель на проводах, которые под действием низкой температуры превращаются в ледяные отложения и оказывают дополнительные механические нагрузки, при которых может произойти обрыв провода. К тому же обледенение поверхности провода способствует появлению потерь мощности, которые будут расходоваться на плавление образовавшегося льда.

Основные факторы, влияющие на эффективность функционирования ВЛЭП, показаны на рис. 1.

Низкие и высокие температуры. Данный фактор подразумевает охлаждение либо нагревание проводов воздушных линий в пределах определенных температур. Понижение температуры влечет за собой «укорочение провода». Также низкие температуры воздуха позволяют увеличивать допустимую по нагреву температуру и ток провода [2]. Соответственно, увеличивается диапазон допустимых значений тока, который может протекать по проводу. Повышение температуры воздуха влечет к тому, что провода ЛЭП начнут увеличиваться в длине за счет увеличения расстояния между молекулами в материале изделия. По этой причине может произойти заметное провисание провода в пролете опор: увеличиться стрела провеса и уменьшится габарит. Такое обстоятельство может быть небезопасно для экс-

Рис. 1. Факторы, влияющие на эффективность функционирования воздушных ЛЭП

плуатации. К тому же повышение температуры воздуха может привести к отжигу провода. В результате чего он потеряет свои функциональные способности и передача электроэнергии будет неэффективной.

Воздействие порывов ветра. Такой фактор способен смещать провода, отклонять их от исходного положения, в результате чего они начинают колебательные движения. Действие ветра способствует появлению пляски и вибрации проводов. Такие случаи, в основном, ведут к соприкосновению фазных проводов и появлению короткого замыкания. Повреждаются не только провода, но и остальное оборудование.

Благодаря ветровому воздействию появляются дополнительные изгибающие усилия на опоры. При сильных ветрах возможны случаи одновременной поломки ряда опор линии [3]. Может возникнуть так называемый «эффект домино», когда падающая от ветра опора за счет провода создает динамическую нагрузку на следующую опору. В момент падения такая опора создает сильное натяжение провода, которое может повлечь падение другой опоры. Такой процесс будет осуществляться до тех пор, пока не оборвется сам провод. Любой из этих случаев ведет к одному результату – прерывание передачи электроэнергии, при котором потребители останутся без электричества.

Вибрация и пляска проводов. Этим явлениям благоприятствует действие ветра. Особую роль в их возникновении играют также гололедные отложения. Пляской проводов ВЛЭП называют низкочастотные колебания провода (от 0,2 до 2 Гц) с большой амплитудой и большой длиной волны [4]. Пляска провода появляется в том случае, когда он обледенел только с одной стороны и одновременно с этим дует ветер. Вибрация же возникает в момент, когда гололедные отложения покрыли всю поверхность провода. Под вибрацией понимают амплитудные колебания проводов в вертикальной плоскости, характеризующиеся относительно малой амплитудой движения – до нескольких сантиметров, но не больше диаметра провода при двойной амплитуде [5].

Оба этих явления наносят вред целостности провода. При длительном действии таких колебаний происходит уменьшение прочности материала провода. Проводники постоянно деформируются, получая множество изломов. Конечным результатом является то, что провода рано или поздно могут оборваться. Для борьбы с пляской и вибрацией на провода устанавливают специальные устройства: гасители пляски и гасители вибрации.

Влажность воздуха – это мера содержания влаги (водяного пара) в воздухе [6]. Водяной пар представляет собой совокупность мельчайших молекул жидкости (воды), находящихся в газообразном состоянии. Когда количество таких молекул увеличивается и сближается друг с другом, влажность воздуха становится повышенной. Воздух при этом становится влажным. Влажность воздуха меняется в зависимости от погодных условий, процессов жизнедеятельности людей. При повышении температуры воздуха происходит его нагревание, в результате чего молекулы жидкости начинают испаряться. Повышение температуры делает воздух сухим. Но в случае понижения температуры воздуха происходит сближение молекул. Таким образом, они могут сконденсироваться и превратиться в жидкое состояние. Такие молекулы превращаются в маленькие капельки воды, которые попадая на провод растекаются по его поверхности. Проблема заключается в том, что при эксплуатации электрической сети при низкой температуре капли воды и их водяной слой могут затвердеть на проводе и образовать тонкую пленку, которая может увеличиваться и вызвать ледяные отложения.

Гололедные отложения. Появление гололеда на проводах и последующее его нарастание (увеличение стенки гололедной муфты) влечет за собой негативное последствие для провода: появление дополнительной и ненужной массы. По мере увеличения стенки гололедной муфты и наличия ветрового воздействия провод все элементы ВЛЭП испытывают дополнительную механическую нагрузку, что в конечном итоге ведет к обрыву проводов, ухудшению защитных свойств изоляторов и разрушению опор. Поэтому данные аварии тяжело устраняются и наносят материальный и экономический ущерб. При этом страдают не только потребители, но и сетевые компании, обслуживающие данные линии, так как это приводит к увеличению затрат на ремонтно-восстановительные работы.

Гололедные отложения вызывают потери при передаче электроэнергии. Когда электрический ток проходит через обледенелый провод, некоторая его часть тратится на плавление льда. Это ведет к росту потерь на контактной сети при передаче электроэнергии.

В связи с этим не весь объем выработанной электроэнергии будет передан конечным потребителям. К тому же гололед является неоднородным диэлектрическим материалом. Из-за этого ток, проходящий по проводу, будет «замедлять» свою скорость передачи. Поэтому необходимо не допускать появление гололедных

отложений, но если это событие произошло, существует ряд методов по ликвидации гололедообразования на ВЛЭП.

Методы борьбы с гололедообразованием

В настоящее время существует четыре метода борьбы с гололедообразованием: электромеханический метод; механический метод; электротермический метод; физико-химический метод. Каждый из приведенных методов имеет свои способы борьбы с гололедом.

Механический метод. Данный метод характеризуется очисткой гололеда посредством механической силы. Существует множество способов по удалению гололедных отложений таким методом. Среди них можно выделить простую обивку провода дежурным персоналом с помощью специальных балок, при котором возникает волнообразное движение провода. Существуют также мобильные установки, которые «катаясь» по проводу срезают гололед с помощью режущих устройств. Также имеется специальная проволока, которая перекидывается через провод, и ее тянет дежурный персонал на автомобильной технике.

Электромеханический метод. Такой метод сочетает устройства, которые преобразуют электрический сигнал в механические колебания провода. Такие устройства содержат в себе блоки электроники, установленные на проводах в пролетах опор. Они подают электрический сигнал, поступивший от устройства обнаружения гололеда (рефлектометр), на специальные генераторы мощных импульсов тока. Те же, в свою очередь, пропускают по проводам электрический ток, предназначенный для разогревания гололедной муфты и образования талой прослойки между гололедом и поверхностью провода. Эти же генераторы формируют мощные импульсы для создания термодинамического удара. Такой удар создает механические колебания такой величины, достаточной для сброса гололедных отложений.

Физико-химический метод. Такой метод содержит в себе материалы, которые не позволяют проводу обледенеть при значительно низких температурах. Такими средствами могут выступать растворы супергидрофобных покрытий, которые наносятся на токоведущие части. Особенность их применения заключается в том, что данный раствор отталкивает воду, не дает задерживаться жидкости на поверхности провода. Капельки воды, попадая на провод, скатываются вниз и падают на землю. Соответственно, такой подход уменьшает риск образования гололедных отложений. Но если все же ледяные отложения появились, то долго они не продержатся, так как с таким раствором в разы уменьшается сцепление льда к проводу. К тому же при нанесенном растворе гололедные отложения легко очищаются на проводе.

Электротермический метод. Данный метод относится к удалению гололеда посредством его плавки на проводах ЛЭП электрическим током. Плавку гололеда осуществляют при уже образовавшемся гололедном отложении путем искусственного повышения тока проводов воздушной линии до такой величины, при которой выделяемой проводами теплоты достаточно для расплавления гололеда [7]. Обычно плавку гололеда осуществляют, увеличивая ток провода в 1,5–2 раза выше предельно допустимого, но на малое время, чтобы не произошел отжиг провода.

Использование рода тока в схемах плавки имеет особое значение. На линиях номинального напряжения до 110 кВ включительно используют плавку гололеда на переменном токе, на линиях от 220 кВ и выше – на постоянном токе. Принципиальные схемы плавки гололеда постоянным и переменным током приведены на рис. 2.

В качестве источника питания здесь устанавливаются шины или отдельный трансформатор [8]. Использование схемы плавки гололеда переменным током не всегда выгодно, поскольку на линиях номинальным напряжением 220 кВ и выше возникает большое реактивное сопротивление, которое уменьшает величину тока плавки и, соответственно, мощность. Поэтому для того, чтобы избавиться от такой величины сопротивления, на высоковольтных линиях 220 кВ и выше используют выпрямительные установки, делая ток постоянным. Также особенностью применения этого метода, в отли-

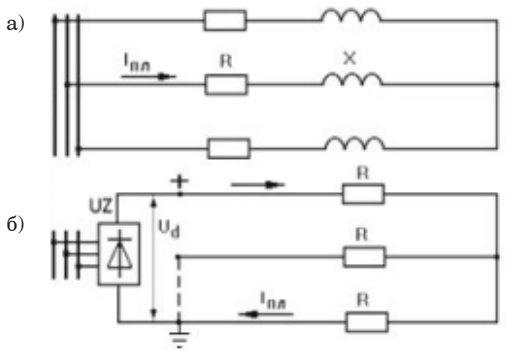


Рис. 2. Принципиальные схемы плавки гололеда переменным (а) и постоянным (б) током

Рис. 3. Фиксирующие устройства (слева направо): ИМФ-3Р, «Сириус-2-ОМП», «ТОР 100-ЛОК», БЭ2704 с функцией ОМП

чие от электромеханического, является то, что во время плавки гололедных отложений на проводах необходимо отключать электрическую цепь.

Способы и средства обнаружения аварийных режимов

При эксплуатации ВЛЭП в присутствии внешних факторов, указанных выше, существует риск появления отклонений рабочих параметров от допустимых значений. В этом случае, когда действующие значения устройства многократно превышают его номинальные значения, заявленные заводом-изготовителем, наступает аварийный режим оборудования, который может повредить установку. Следствие поврежденных участков ведет к тому, что система перестает нормально функционировать. Для того, чтобы вовремя такие случаи предотвратить, их необходимо вовремя обнаружить.

Существует два способа обнаружения аварийных режимов – дистанционный и топографический [9].

В дистанционном способе могут использоваться фиксирующие устройства, которые определяют расстояние от самих себя до места аварии и соответствующие электрические величины режимных параметров участка сети, где произошло повреждение. Как правило, такие устройства в момент нагрузок, значительно превышающих предельно-допустимые параметры, фиксируют действующие значения за доли секунды до отключения питания по линии средствами защиты. Современными представителями данного типа устройств являются изображенные на рис. 3 фиксирующие индикаторы серии ИМФ, «Сириус-2-ОМП», «ТОР-Локатор» и т. д., а также микропроцессорные терминалы релейной защиты со встроенной функцией обнаружения места повреждения (ОМП), например, БЭ2704 производства НПП «Экра» [9].

Другим представителем данного способа является рефлектометр. Согласно [9], такое устройство испускает электрические зондирующие импульсы по ВЛЭП в одну и другую сторону. Данные импульсы отражаются от появившегося повреждения и возвращаются обратно. Основными характеристиками импульса в данном случае являются время прохождения по линии и его скорость. Благодаря этим параметрам прибор определяет дистанцию до предполагаемого места аварии. Наглядно принцип работы такого устройства показан на рис. 4.

В топографическом способе используются устройства, способные определять место повреждения и в каком направлении это произошло [10]. К таким устройствам относятся:

– указатель поврежденного участка (УПУ) – устройство, принцип действия которого основан на использовании датчика магнитного поля для бесконтактного измерения тока, протекающего по фазным проводам, а также элемента отбора напряжения (дополнительного изолятора, подвешенного на проводе, или четвертого провода в одном из пролетов) для автоматического возврата указателя в исходное состояние при восстановлении электроснабжения;

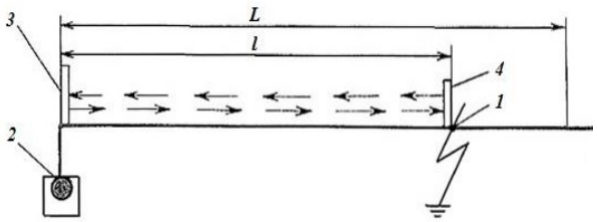


Рис. 4. Схема прохождения высокочастотного импульса при локационном методе ОМП: 1 – место повреждения; 2 – локационный искатель; 3 – зондирующий импульс; 4 – отраженный импульс; L – общая длина линии; l – расстояние до места повреждения

– указатель короткого замыкания (УКЗ) – устройство, снабженное магнитными датчиками, элементом отбора напряжения и флажковым электромеханическим индикатором.

Современные технологии, способствующие повышению надежности функционирования ВЛЭП

В настоящее время назревает актуальная проблема надежности функционирования линий электропередач. От надежности зависит срок службы электрической сети и бесперебойность электроснабжения. Процесс старения оборудования является нормальным и неизбежным. По этой причине происходит постепенный износ системы линий электропередач: как физический, так и моральный. Поэтому необходимо своевременно обслуживать или производить замену на новое оборудование в случае, если осуществить ремонт нецелесообразно.

Процесс повышения надежности можно осуществлять путем периодического ремонта системы либо полной или частичной замены конструкции на новые элементы. Но в случае кардинальных изменений в области повышения надежности функционирования ВЛЭП без нового оборудования такую задачу осуществить не представляется возможным. Отсюда следует вывод, что необходимо разрабатывать такие устройства и детали, которые будут иметь большое преимущество перед своими предыдущими аналогами.

Одним из способов повышения надежности является использование принципиально новых стальных многогранных оцинкованных опор закрытого профиля опор по сравнению обычных металлических, железобетонных и деревянных. Согласно [13], основными преимуществами такого решения являются: технологичность при изготовлении и монтаже; долговечность за счет обтекаемой формы (вода не скапливается на деталях опоры). Также целесообразно применять унифицированные опоры – это уменьшит расходы материалов и удешевит конструкцию.

Другим способом повышения надежности является применение модернизированных проводов. Существуют провода с использованием новой конструкции и новых материалов, способных обеспечивать большую прочность по сравнению с традиционными проводами. Благодаря этому увеличится пропускная способность провода и уменьшатся потери мощности при передаче электроэнергии.

Обследование ВЛЭП с помощью лидара

Как правило, для нормальной работы линий электропередач необходимо поддерживать ее составные части в исправном состоянии. Для этого требуется проводить ежедневное обслуживание, своевременный ремонт и устранять аварийные режимы. Чтобы осуществлять данные мероприятия, необходимо производить мониторинг линий. Как правило, мониторинг осуществляет дежурный персонал, который совершает обход линий. И зачастую люди используют специальные наземные методы наблюдения или фотограмметрии.

Применение такой методики не всегда дает положительный результат, так как всегда присутствует человеческий фактор: кто-то может что-то не дописать, не доглядеть и не увидеть. Поэтому на данный момент ведутся разработки по автоматизации мониторинга ВЛЭП.

В настоящее время одним из известных устройств автоматизации мониторинга является прибор для воздушного лазерного сканирования ВЛЭП. Такое устройство называется «лидар» (Lidar).

Лидар – это устройство на базе беспилотного аппарата, инструмент для сканирования различных объектов. Для сканирования он использует лазерный луч. В основе работы устройств типа lidar-сканер лежит использование лазерных лучей. Сканер выпускает луч, который отражается от впереди стоящего объекта и возвращается в сканер [11]. Таким образом, лидар выводит изображение о состоянии объектов, попавших в его зону сканирования. Структурная схема работы устройства [14] изображена на рис. 5.

На рис. 6 показаны различные способы сканирования объекта с помощью лидара.

Достоинством данного метода является то, что применительно к ВЛЭП это устройство мо-

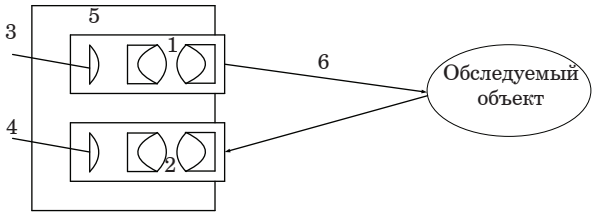


Рис. 5. Структурная схема лидара:
1 – сканер-излучатель; 2 – сканер-приемник;
3 – источник света; 4 – прибор, формирующий цветовое изображение о состоянии объекта; 5 – корпус лидара;
6 – испускаемый лазерный луч

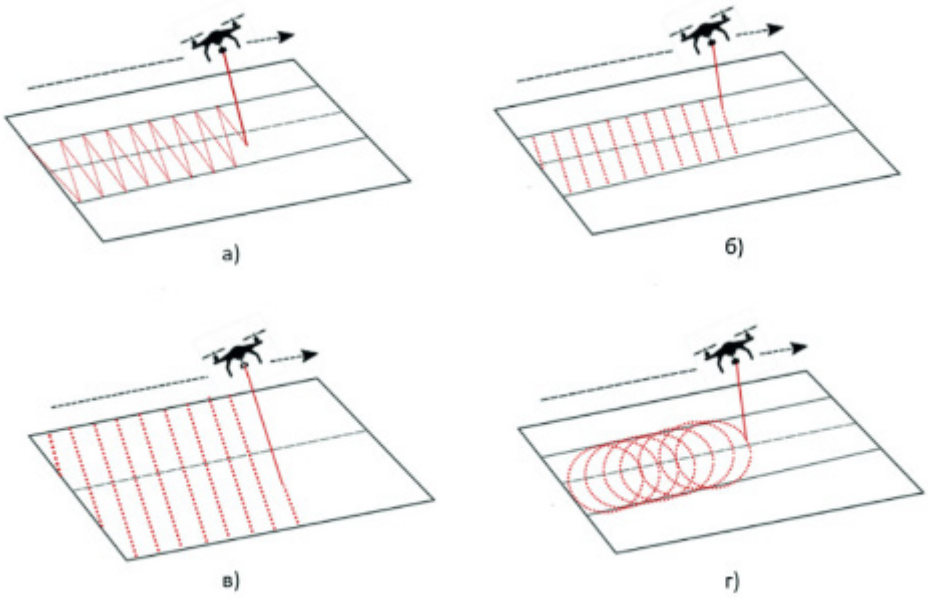


Рис. 6. Способы сканирования: а – сканирование поверхности «зигзагом»; б – сканирование ограниченной поверхности косыми линиями; в – сканирование всей поверхности косыми линиями; г – сканирование поверхности круговыми движениями

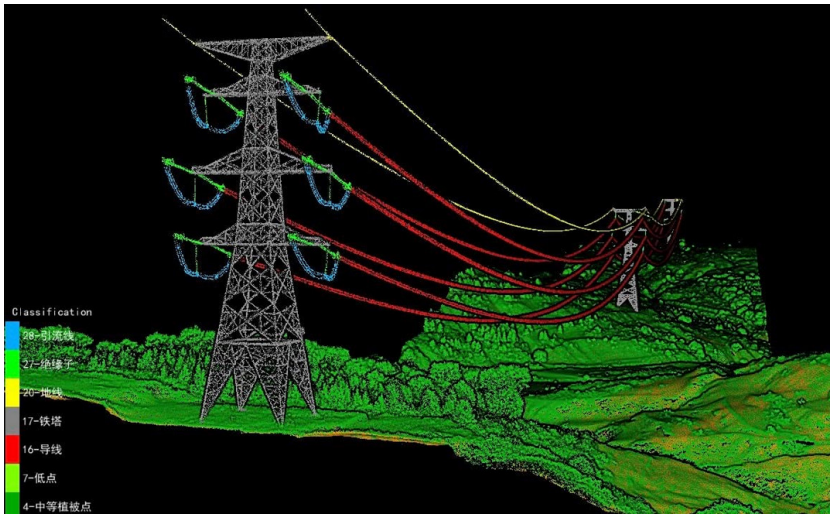


Рис. 7. Результат сканирования ВЛЭП

жет производить мониторинг без участия человека, постоянно сканируя систему элементов. Обнаружив неисправность, устройство подаст сигнал в диспетчерский пункт. Лидар незаменим при измерении температуры проводов – сканируя элементы конструкции ВЛЭП, он формирует цветовое изображение с распределением температурного состояния проводов [12] (рис. 7). В случае, когда происходит сильное повышение температуры линий, значительно превышающих предельно допустимые, лидар сформирует сигнал об опасности пережигания провода.

Сканируя ВЛЭП, лидар может создать ее температурную модель – цветовую модель распределения температуры. Пример цветовой модели распределения температуры, формируемой данным устройством, показан на рис. 8.

Такая модель позволяет уточнить, в каких направлениях распределяется температура в процессе эксплуатации линий электропередач. При работе воздушных линий в резуль-

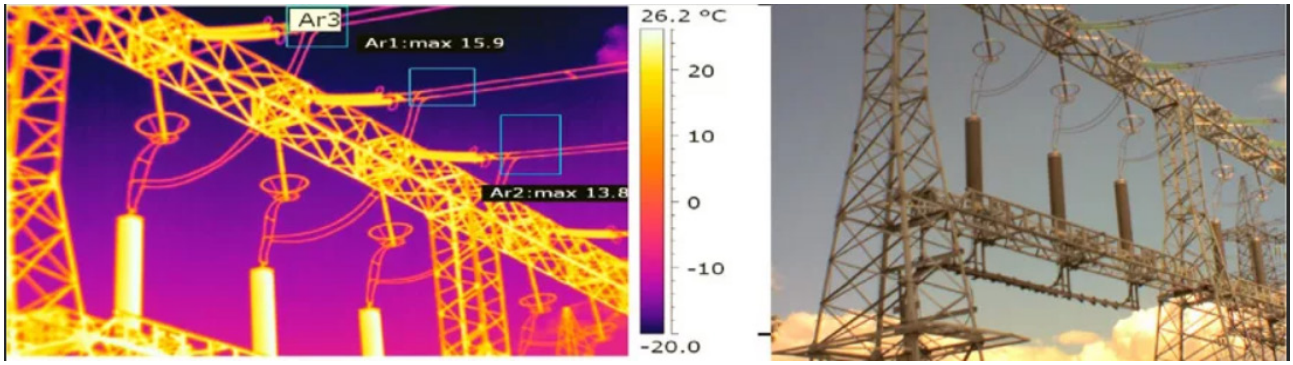


Рис. 8. Температурная модель ВЛЭП

тате производства и передачи электрической энергии происходит постепенное нагревание конструктивных элементов системы. Соответственно, нагревание элементов подразумевает собой увеличение их температуры. Чем выше температура, тем ярче становится цвет элементов на модели, созданной лидаром. Яркие оттенки цвета модели, представленной на рис. 8, показывают нагретые конструктивные элементы системы ВЛЭП.

Белый цвет температурной модели показывает самую высокую величину теплового режима. В случае появления такого оттенка на элементах может произойти перегрев и разрушение материала. Лидар сообщает о таких состояниях в диспетчерский пункт для принятия соответствующих мер.

Тепловой расчет проводов ВЛЭП

Качество передаваемой электроэнергии зависит от многих факторов – от номинального напряжения ЛЭП, сечения проводов, конструктивной целостности проводов, погодных условий, температуры токоведущих частей.

В номинальном режиме работы электрической сети протекающий по проводам ток нагревает линию, что сопровождается повышением температуры. Нагрев токоведущих элементов ВЛЭП постепенно ухудшает конструктивные свойства, что в итоге ведет к увеличению потерь напряжения, ускоренному износу изоляции, а также к пробою и даже короткому замыканию [15]. Поэтому необходимо контролировать значение температуры провода.

На этапе проектирования и реконструкции участков электрической сети необходимо проводить расчеты изменения потерь при увеличении температуры провода. Согласно методике [15], расчет активного и реактивного сопротивления линии соответственно при нормальной температуре t_1=20 °С выполняется по формулам:

$$R_1 = r_0 L; \;\; X_1 = x_0 L,$$

где L – длина проводника; r_0 и x_0 – погонное активное и реактивное сопротивления соответственно.

Таким образом, потери напряжения определяются:

$$\Delta U = \frac{(P_{\text{р}} R_1 + Q_{\text{р}} X_1)}{U_{\text{н}}},$$

где $P_{\text{р}}$ – расчетная активная мощность, кВт; $Q_{\text{р}}$ – расчетная реактивная мощность, кВар; $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение линии, кВ.

Потери напряжения, выраженные в процентах:

$$\delta U = \frac{\Delta U}{U_{\text{н}}} \cdot 100.$$

Затем сравнивают расчетное значение потерь напряжения с заданной допустимой потерей напряжения.

При увеличении температуры провода происходит перерасчет активного сопротивления и потерь напряжения. К примеру, при увеличении температуры в 1,5 раза, т. е. t_2=1,5t_1, активное сопротивление линии будет пересчитано по формуле:

$$R_2 = R_1(1 + \alpha \Delta t),$$

где α – температурный коэффициент для алюминиевых проводов, обычно α=0,00403 °С$^{-1}$; Δt – изменение температуры, разность между фактической и нормальной температурой.

Тогда при повышении температуры активное сопротивление проводника будет выше: R_2=1,0403R_1.

Потери напряжения:

$$\Delta U = \frac{P_{\text{р}} \cdot 1{,}0403 R_1 + Q_{\text{р}} X_1}{U_{\text{н}}}.$$

Таким образом, очевидно, что потери напряжения увеличиваются. По сравнению с прежней температурой, потери напряжения провода стали выше в 1,02015 раза.

Заключение

Процесс передачи электрической энергии является ответственной и важной задачей, поскольку прерывание электроэнергии влечет к ее недоотпуску. Потребители перестанут получать электрическую энергию, необходимую для разных нужд. Температура оказывает отрицательное воздействие на провода ВЛЭП, поскольку не только ухудшается состояние провода, но и увеличиваются потери напряжения при передаче электроэнергии.

Список источников

1. Производственное объединение «КАЗМЕТ-СЕРВИС»: раздел «Информация». Работа воздушных линий электропередач и правила безопасной эксплуатации. URL: https://kzmc.kz/articles/rabota_vozdushnyh_linij_elektroperedach_i_pravila_bezopasnoj_ekspluatacii/?ysclid=lpwhsievkd197975756 (дата обращения: 08.12.2023).

2. Электронный ресурс «Инфоурок». Исследования причин отключения высоковольтных линий электропередач. URL: https://infourok.ru/referat-na-temu-issledovanie-prichin-otklyucheniya-vysokovoltnyh-linij-elektroperedach-5787162.html?ysclid=lpwiyc62oo635479686 (дата обращения: 08.12.2023).

3. Наука через призму времени: Классификация климатических факторов, воздействующих на ЛЭП. URL: http://www.naupri.ru/journal/3675 (дата обращения: 08.12.2023).

4. *Каверина Р. С., Яковлев Л. В.* Рекомендации по применению ограничителей гололедообразования и колебаний ОГК, гасителей пляски ГПП и ГПР. М.: Инженерный центр ЕЭС – ОРГРЭС, 2005. 11 с.

5. Сайт энциклопедия инженера электрика «ASUTPP»: раздел «Электроснабжение: электрические сети». Вибрация и пляска проводов на воздушных ЛЭП. URL: https://www.asutpp.ru/vibratsiya-i-plyaska-provodov.html (дата обращения: 08.12.2023).

6. Официальный сайт компании «Легенда – инженерные системы»: раздел «Библиотека». Влажность воздуха и его свойства. URL: https://legenda-spb.com/blog/vlazhnost-vozduha-i-ego-svojstva (дата обращения: 10.12.2023).

7. *Никитина И. Э., Абдрахманов Н. Х.,* Никитина С .А. Способы удаления льда с проводов линий электропередач // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. Уфа: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т, 2015. С. 794–819.

8. *Молошная Е. С., Мельников И. В., Козоброд В. Н.* Анализ методов плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи в условиях южного региона. // Эксплуатация объектов атомной отрасли: электрон. науч. журн. Волгодонск: Волгодон. инженер.-техн. ин-т – филиал Национального исслед. ядерного ун-та МИФИ, 2020. С. 92–98.

9. *Дементьев С. С.* Интеллектуальная система мониторинга гололедообразования на воздушных линиях электропередач: дис. … канд. техн. наук. Волгоград: ВГТУ, 2019.

10. *Кузнецов А. П.* Определение мест повреждения на воздушных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 1989. 94 с.

11. Эльдоблог: раздел «Публикации». Lidar: что это за технология и зачем она нужна. URL: https://blog.eldorado.ru/publications/lidar-chto-eto-za-tekhnologiya-i-zachem-ona-nuzhna-35587 (дата обращения: 12.12.2023).

12. Лазерные сканирующие технологии для предприятий: раздел «Программное обеспечение». URL: https://alfascaner.ru/catalog/programmnoe-obespechenie/proizvoditel-3/kopiya-liair-v.html?ysclid=lq24ja6ocz366075563 (дата обращения: 12.12.2023).

13. Файловый архив для студентов StudFiles: раздел «Мероприятия по повышению надежности воздушных линий». URL: https://studfile.net/preview/2215989/page:6/ (дата обращения: 12.12.2023).

14. Информационный сайт по продукции DJI: раздел «Использование беспилотных платформ, оснащенных «Lidar». URL: https://dji-blog.ru/naznachenie/geodesia/kak-ispolzovat-bespilotnye-platformy-osnashhennye-lidar.html?ysclid=lq4wwry3jf746348285 (дата обращения: 14.12.2023).

15. *Кряжева А. А., Долгова А. Е., Горбунов Р. В.* Учет нагрева проводов воздушной линии при расчете потерь напряжения // Молодой ученый: Междунар. науч. журн. Чита: Забайкальский гос. ун-т, 2022. С. 94–95.

УДК 621.314.6 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-212-217**

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПУСКА СИЛОВОГО СОГЛАСУЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГРЕБНОГО ВИНТА

Рассмотрены вопросы моделирования электромагнитных переходных процессов плавного пуска силового согласующего трансформатора преобразователя частоты со звеном постоянного тока. Получены результаты моделирования плавного пуска трансформатора без учета остаточного потока намагничивания и с учетом остаточного потока намагничивания. По результатам исследований определены безопасные режимы пуска трансформатора.
Ключевые слова: *трансформатор, преобразователь частоты, конденсаторы, пуск, модель, ток, напряжение.*

A. A. Martynov*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SIMULATION OF THE START-UP PROCESS OF A POWER MATCHING TRANSFORMER OF A FREQUENCY CONVERTER OF AN ELECTRIC DRIVE OF A PROPELLER

The issues of modeling electromagnetic transients of soft start of a power matching transformer of a frequency converter with a DC link are considered. The results of simulation of the transformer's soft start without taking into account the residual magnetization flux and taking into account the residual magnetization flux are obtained. Based on the results of the studies, safe modes of transformer start-up were determined.
Keywords: *transformer, frequency converter, capacitors, starting, model, current, voltage.*

Введение

Преобразователи частоты со звеном постоянного тока находят широкое применение в судовых электроприводах гребных винтов. Преобразователь частоты включает в себя силовой согласующий трансформатор, как правило, с двумя вторичными обмотками, емкостной фильтр и инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией. Процесс включения преобразователя в работу начинается с подачи напряжения переменного тока на первичную обмотку трансформатора или на одну из его вторичных обмоток, которая выполняет на момент пуска функцию обмотки намагничивания. При этом одновременно с процессом намагничивания магнитопровода трансформатора происходит и заряд конденсаторов емкостного фильтра. После того, как напряжение на конденсаторах фильтра достигнет заданного значения, следует подать импульсы управления на транзисторы инвертора напряжения и включить его в работу и тем самым включить в работу электропривод в целом. Совершенно очевидно, что прямой пуск трансформатора в этом случае не возможен, поскольку при прямом пуске бросок тока в обмотке, через которую производится процесс пуска, будет чрезмерно велик. Поскольку прямой пуск трансформатора сопровождается резким увеличением тока намагничивания в первичной обмотке трансформатора [1]. В первую очередь, это связано с появлением свободной составляющей потока $\Phi_{св}$, которая увеличивает амплитуду результирующего поток Ф в два раза по сравнению с потоком установившегося режима холостого хода, амплитуда которого равна Φ_m. Кроме этого, необходимо учитывать наличие потока остаточного намагничивания магнитопровода трансформатора $\Phi_{ост}$. Величина потока остаточного намагничивания может быть равной от 0,3 Φ_m [2] до 0,7 Φ_m [3].

Параметры силового трансформатора и цепи постоянного тока преобразователя

Номер	Параметр	Тип/величина
Трансформатор		
1	Мощность трансформатора	2 МВА
2	Номинальный ток фазы первичной обмотки	1675 А
3	Линейное напряжение первичной обмотки	690 В
4	Ток холостого хода фазы первичной обмотки	$I_{хх}$= 0,2+30 %
5	Напряжение короткого замыкания	$U_к$= 5–7 %
6	Линейное напряжение первой вторичной обмотки	$U_{л2,1}$ = 480 В
7	Линейное напряжение второй вторичной обмотки	$U_{л2,2}$ = 480 В
Звено постоянного тока		
7	Среднее значение выпрямленного напряжения двух последовательно соединенных выпрямительных мостов	U_{d0} = 1357 В
8	Среднее значение тока цепи постоянного тока выпрямителей	I_{dN} = 1473 А
9	Емкость конденсаторной батареи, включенной в цепь постоянного тока одного выпрямителя	C = 10 000 мкФ

Из-за нелинейности кривой намагничивания магнитопровода трансформатора увеличение амплитуды магнитного потока сопровождается резким увеличением амплитуды тока намагничивания. В преобразователе частоты со звеном постоянного тока амплитуда броска тока будет выше амплитуды броска тока намагничивания, поскольку к этому току будет прибавляться и составляющая тока заряда конденсаторов фильтра. Для ограничения амплитуды броска тока при пуске трансформатора применяют устройства плавного пуска (УПП). Часто в качестве УПП применяют тиристорные регуляторы переменного напряжения.

Важнейшими показателями работы электропривода гребного винта являются высокая надежность и безотказность в работе. Достижение этих показателей качества электропривода невозможно без глубокого исследования переходных процессов пуска трансформатора и преобразователя частоты в целом. Результаты исследования позволяют обосновать режимы По результатам выполненных исследований следует выбрать такие режимы плавного пуска, при которых не возникают недопустимые перегрузки по току и напряжению трансформатора, вентилей и конденсаторов фильтра преобразователя частоты.

В настоящее время для исследования переходных процессов пуска трансформатора широкое применение находят компьютерные модели, выполненные с использованием программной среды MatLab-Simulink [4].

Моделирование процесса плавного пуска силового согласующего трансформатора

Рассмотрим исследование электромагнитных переходных процессов плавного пуска силового согласующего трансформатора преобразователя частоты со звеном постоянного тока электропривода гребного винта. Основные параметры силового трансформатора и цепи постоянного тока преобразователя частоты приведены в таблице.

На рис. 1 приведена структурная схема объекта исследования – звена постоянного тока преобразователя частоты электропривода гребного винта при подключении УПП к первичной обмотке трансформатора.

На структурной схеме приведены следующие блоки:

– трансформатор силовой;

– блок выпрямительный;

– блок конденсаторный;

– устройство плавного пуска, УПП;

На рис. 1 показаны также сигналы параметров трансформатора и звена постоянного тока для осциллографирования переходных процессов пуска трансформатора и звена постоянного тока:

– $U1$, $I1$ – напряжение и ток первичной обмотки силового трансформатора;

– Uc, Ic – напряжение и ток конденсаторов емкостного фильтра.

С использованием программной среды MatLab-Simulink [4] и структурной схемы (рис. 1) разработана модель пуска трансформатора в составе преобразователя частоты со звеном постоянного тока электропривода гребного винта (рис. 2).

На рис. 2 показан общий вид модели системы пуска трансформатора, в которую входят:

– источник трехфазного переменного напряжения (690 В);

– устройство плавного пуска (УПП);

– трехобмоточный трансформатор (трансформатор 2 МВА);

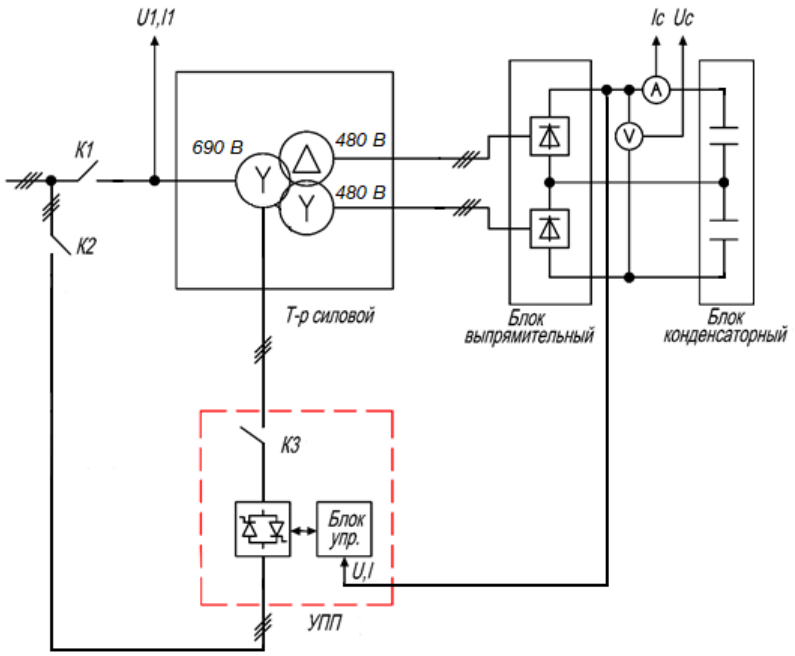


Рис. 1. Структурная схема звена постоянного тока преобразователя частоты электропривода гребного винта с УПП, включенным в цепь первичной обмотки трансформатора

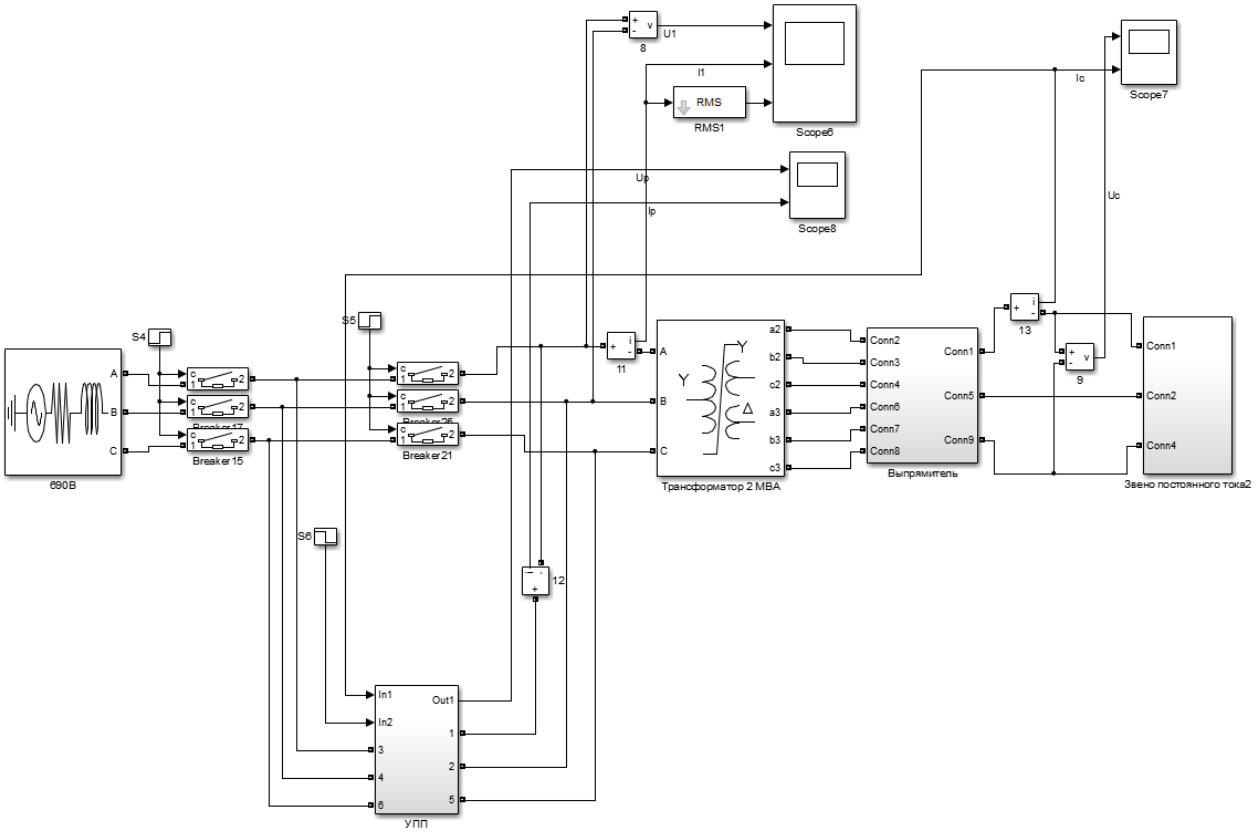


Рис. 2. Общий вид модели системы пуска трансформатора

– выпрямитель;

– звено постоянного тока;

– коммутационное оборудование и средства измерения напряжений и токов.

Модель позволяет выполнить исследования переходных процессов плавного пуска трансформатора с использованием УПП, выполненного на основе тиристорного регулятора напряжения ТРН, как без учета, так и с учетом остаточного потока намагничивания магнитопровода трансформатора.

При моделировании переходных процессов трансформатора в программной среде MatLab-Simulink характеристика намагничивания трансформатора задается кусочно-линейной зависимостью между потокосцеплением и током намагничивания в относительных единица, $\Psi = f(I_{\mu})$.

Максимальная амплитуда импульса тока при включении трансформатора зависит от фазы включения, величины остаточного потока намагничивания, значения потокосцепления в точке излома характеристики намагничивания и наклона характеристики намагничивания в области насыщения. Следует отметить, что ошибка в задании наклона характеристики намагничивания в области насыщения при моделировании процесса пуска трансформатора приводит к появлению существенных погрешностей в расчете амплитуды броска тока.

Результаты моделирования процессов плавного пуска силового согласующего трансформатора приведены в виде осциллограмм электромагнитных процессов на рис. 3–6.

На осциллограммах приведены временные диаграммы следующих параметров:

– линейное напряжение первичной обмотки трансформатора, $u_{л1} = f(t)$;

– ток фазы первичной обмотки трансформатора (мгновенное значение), $i_{ф1} = f(t)$;

– ток фазы первичной обмотки трансформатора (действующее значение), $I_{ф1} = f(t)$;

– напряжение на конденсаторе фильтра, $U_c = f(\mathrm{t})$;

– ток конденсатора фильтра (мгновенное значение), $i_c = f(\mathrm{t})$.

На рис. 3; 4 приведены временные диаграммы перечисленных выше параметров при пуске трансформатора за 10 с при условии отсутствия остаточного потока намагничивания магнитопровода трансформатора. Подключение трансформатора непосредственно к источнику трех-

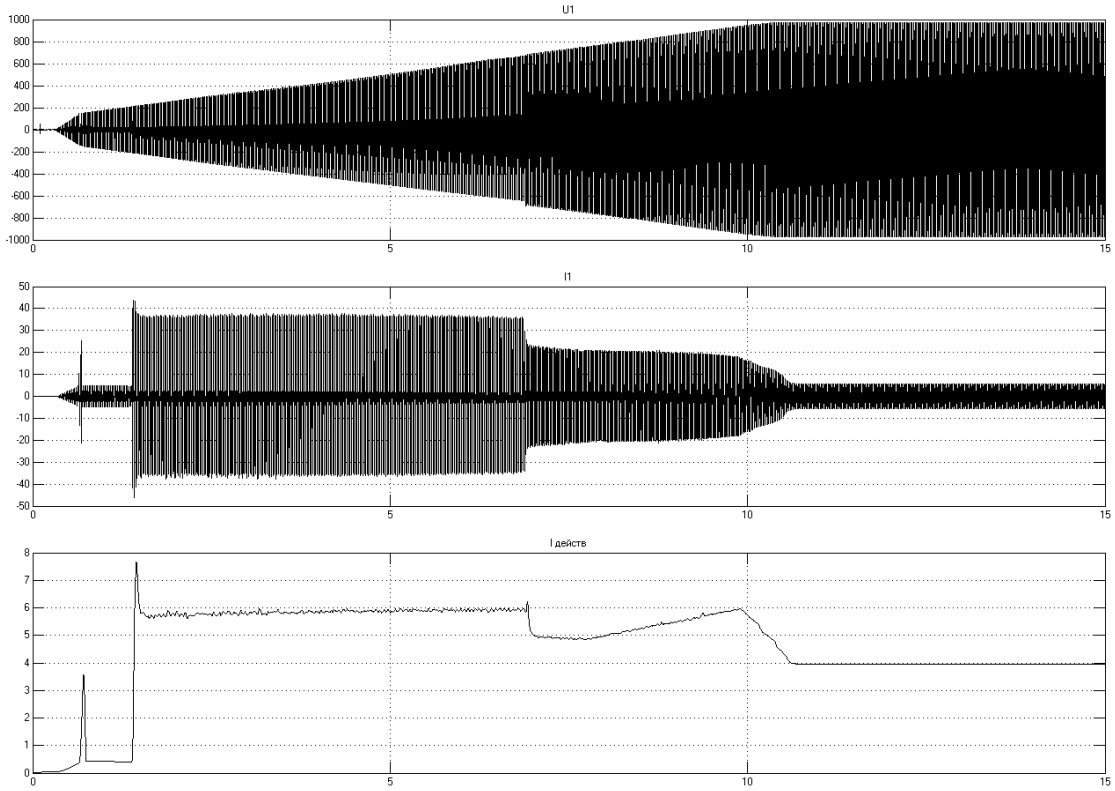


Рис. 3. Осциллограммы напряжения и тока первичной обмотки трансформатора при отсутствии остаточного потока намагничивания и пуске за 10 с

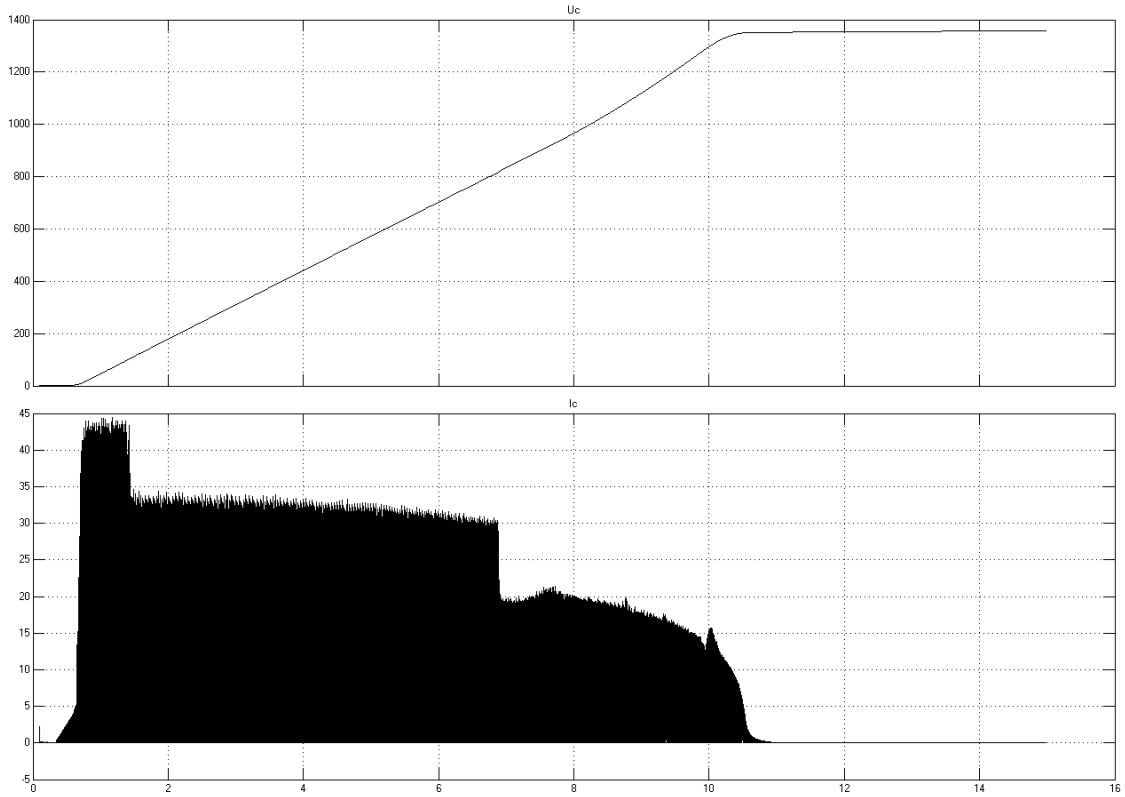


Рис. 4. Осциллограммы напряжения и тока конденсатора фильтра при отсутствии остаточного потока намагничивания и пуске за 10 с

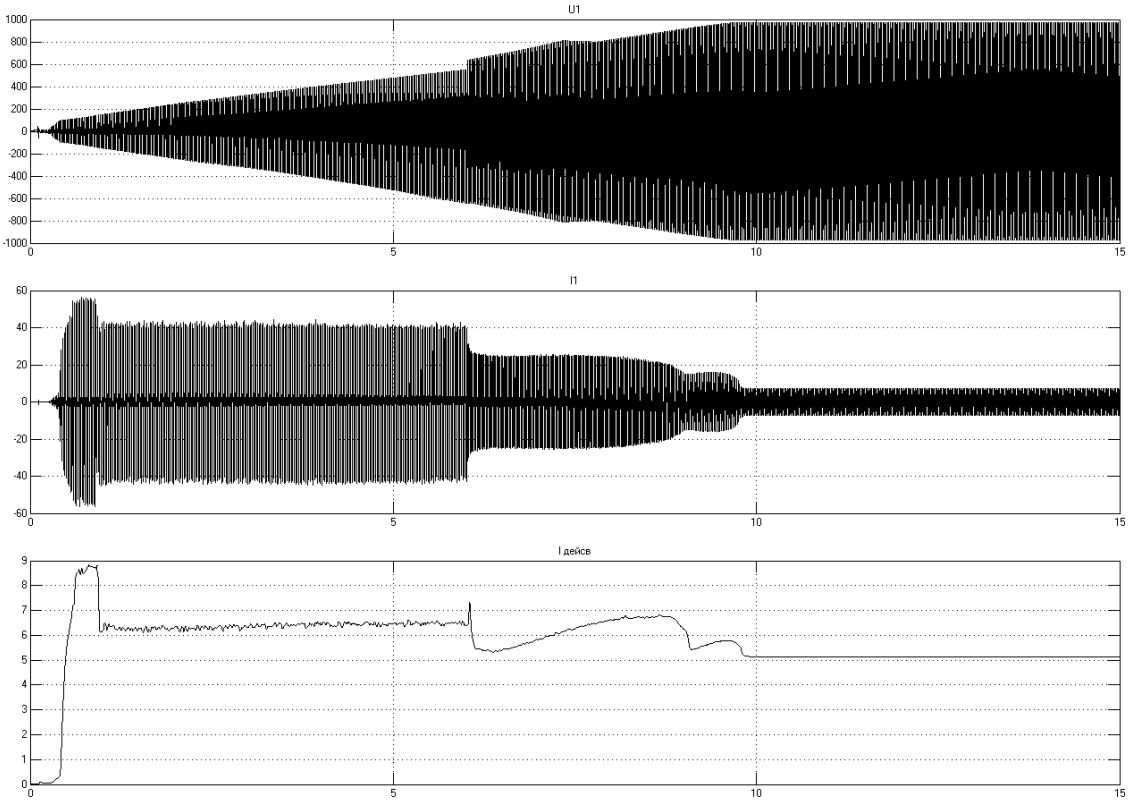


Рис. 5. Осциллограммы напряжения и тока первичной обмотки трансформатора при наличии остаточного потока намагничивания и пуске за 10 с

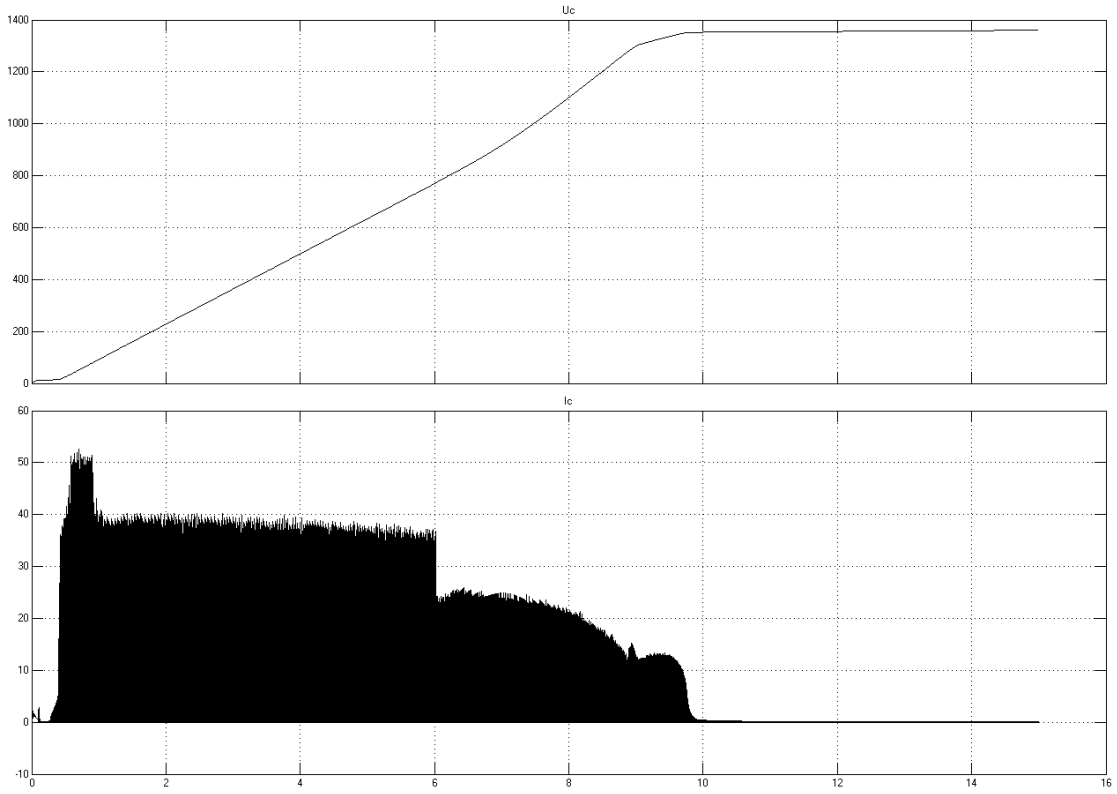


Рис. 6. Осциллограммы напряжения и тока конденсатора фильтра при наличии остаточного потока намагничивания и пуске за 10 с

фазного переменного напряжения проведено на 12-й секунде.

На рис. 5; 6 приведены временные диаграммы перечисленных выше параметров при пуске трансформатора за 10 с при наличии остаточного потока намагничивания магнитопровода трансформатора.

Выводы

1. Переходный процесс плавного пуска трансформатора за 10 с при отсутствии остаточного потока намагничивания и использовании УПП с ТРН и обратной связи по току заряда характеризуется отсутствием существенных бросков тока намагничивания трансформатора и тока заряда конденсаторов на всем протяжении переходного процесса. Амплитуда тока фазы первичной обмотки трансформатора составляет 37 А, а действующее значение этого тока составляет 6 А.

2. Переходный процесс плавного пуска трансформатора при наличии остаточного потока намагничивания, равном $\Phi_{ост2} = 0{,}4\Phi_m$, и использовании УПП с ТРН и обратной связи по току заряда сопровождается броском тока первичной обмотки трансформатора в момент включения УПП. Амплитуда импульса броска тока обмотки намагничивания достигает 55 А, а действующее значение этого тока составляет 6,5 А.

3. В целом реализация плавного пуска сетевого согласующего трансформатора позволяет выполнить пуск трансформатора за 10 секунд при достаточно низком действующем значении тока первичной обмотки трансформатора и вентилей тиристорного регулятора напряжения.

Список источников

1. *Рихтер Р.* Электрические машины. Т. 3: Трансформаторы. М.: Главная редакция энергетической литературы, 1935. 292 с.

2. *Пиотровский Л. М.* Электрические машины. М.; Л.: Гос. энергет. изд-во, 1950. 528 с.

3. *Петров Г. Н.* Электрические машины: в 3 ч. Ч. 1: Введение. Трансформаторы. 3-е изд., перераб. М.: Энергия, 1974. 240 с.

4. Моделирование электромагнитных процессов пуска трансформатора в составе преобразователя частоты электропривода гребного винта / А. А. Мартынов [и др.] // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2023. Т. 3, № 405. С. 99–115.

УДК 620.1+676.019 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-218-227**

М. К. Прокофьева*
аспирант
В. В. Булатов*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОБЗОР МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА

Проведен обзор различных методов контроля качества листового металла, стекла и композитного материала. Выделены преимущества и недостатки рассматриваемых методов. Приведены примеры современных систем и оборудования для контроля качества.
Ключевые слова: *контроль качества, листовой материал, металл, стекло, композитный материал, неразрушающие методы контроля.*

M. K. Prokofiev*
PhD Student
V. V. Bulatov*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

REVIEW OF QUALITY CONTROL METHODS FOR SHEET MATERIAL

The article reviewed various methods of quality control for sheet metal, glass, and composite materials. The advantages and disadvantages of the discussed methods are highlighted. Examples of modern systems and equipment for quality control are provided.
Keywords: *quality control, sheet material, metal, glass, composite material, non-destructive testing methods.*

Развитие технологий на производствах и скорость производственных линий в Четвертую промышленную революцию требует корректного, оперативного и непрерывного контроля качества материалов, так как от этого зависит прибыль и репутация компании. Существующие на данный момент методы дефектоскопии разделяют на разрушающие и неразрушающие.

К разрушающим методам контроля относятся механические испытания, металлографические испытания, испытания на износостойкость, испытания давлением, тепловые испытание, химические испытания.

Особое внимание уделяется неразрушающим методам контроля (рис. 1), которые классифицируются в зависимости от способов обнаружения дефектов и основаны на общих физических явлениях или свойствах, лежащих в основе разработки средств для обнаружения дефектов.

Для листовых материалов используются различные методы дефектоскопии, в частности, неразрушающего контроля. В данной статье рассмотрим контроль качества металла, стекла и композитного материала.

На многих металлургических заводах проводятся эксперименты по учету и компьютерному анализу параметров процесса производства листового проката. Определяют его качество, включая такие факторы, как холодная деформация, рекристаллизационный отжиг и другие процессы [1]. Применение анализа [2–4] позволяет делать выводы о структурных изменениях материала и взаимосвязанных характеристиках. Однако это не полностью решает задачу обеспечения необходимого качества листового проката, так как отсутствует достоверный источник информации о свойствах и состоянии металла в реальном времени. Примеры дефектов, которые необходимо отслеживать в производстве листового металла, приведены на рис. 2.

Средства выборочного неразрушающего контроля также не решают данную проблему [5–7]. Поэтому повышение гарантии механических свойств листового проката сталей требует внедрения систем неразрушающего контроля в производственный процесс. Эти системы основаны на использовании следующих методов контроля – ультразвуковой [8], вихретоковый [9] и магнитный [10].

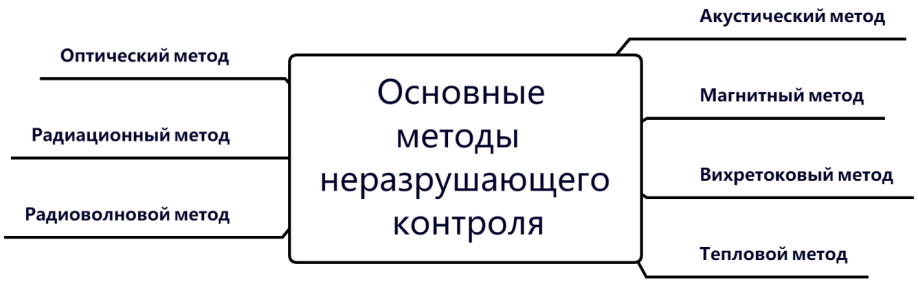


Рис. 1. Методы неразрушающего контроля

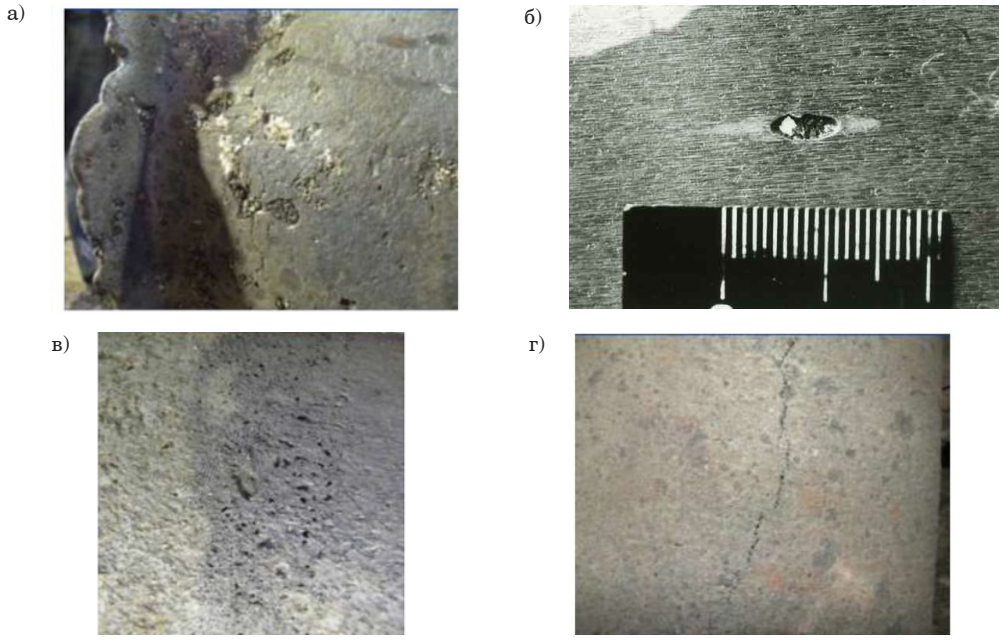


Рис. 2. Примеры дефектов листового проката:
а – неметаллические включения; б – раковина; в – подкорковые пузыри; г – трещины

Метод ультразвукового контроля листового проката (рис. 3, *а*) прописан в ГОСТ 22727-88 [11]. Этот стандарт устанавливает эхо-метод, теневой, эхо-сквозной и многократно-теневой в сочетании с теневым, эхо-метод в сочетании с зеркально-теневым. Методы ультразвукового контроля листового применяются для выявления несплошностей металла типа расслоений, скоплений неметаллических включений, закатов, отслоений плакирующего слоя и определения их условных или эквивалентных размеров проката из углеродистой и легированной сталей, в том числе двухслойной, толщиной от 0,5 до 200 мм.

Стандарт не устанавливает методы ультразвукового контроля для распознавания типов, ориентаций и других действительных характеристик дефектов.

Ультразвуковой метод функционирует на основе измерения времени, за которое ультразвуковые волны проходят через материал. Если в материале есть дефекты, то ультразвук может отражаться или рассеиваться, что помогает определить размеры и природу этих дефектов.

Вихретоковым контролем листового проката (рис. 3, *б*), по ГОСТ Р ИСО 15549-2009 [12], можно произвести идентификацию неоднородностей в изделии, которые могут негативно влиять на его соответствие назначению; измерение толщины покрытий или слоев; измерение других геометрических характеристик; измерение металлургических или механических свойств изделия; измерение проводимости и (или) проницаемости изделия.

При вихретоковом методе проводящий материал подвергается воздействию возбужденного электромагнитного поля, возникают вихревые токи в материале. Эти токи, в свою очередь, порождают свои собственные электромагнит-

а) б)

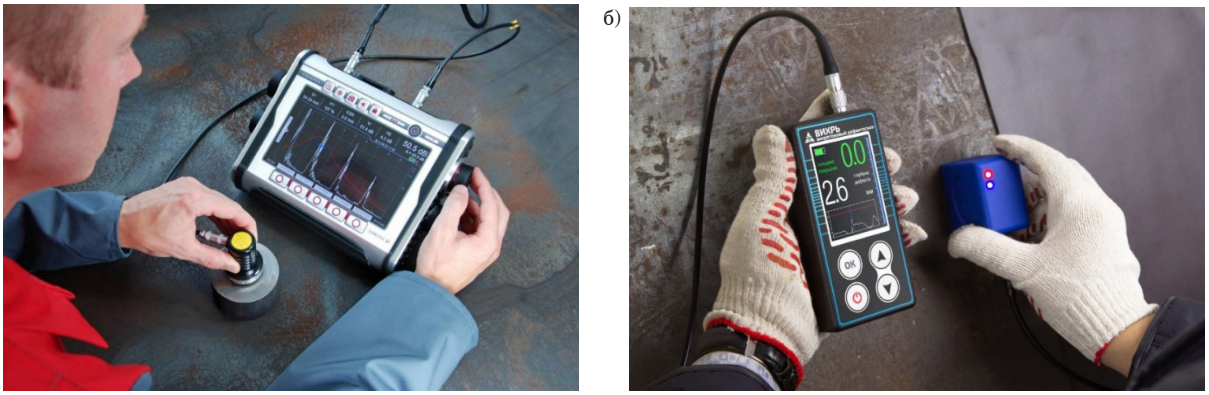


Рис. 3. Методы контроля листового проката: а – ультразвуковая дефектоскопия; б – вихретоковая дефектоскопия

ные поля. Если в проводящем материале имеются дефекты, эти сгенерированные поля вихревых токов будут различаться от полей, которые возникают в материале без дефектов. Изменения в электромагнитных полях регистрируются специальным оборудованием, обрабатываются и отображаются на экране монитора в виде изображений или графиков.

Магнитный методом контроля (рис. 4), по ГОСТ 30415-96, определяет предел текучести физического, условного, временного сопротивления, относительного удлинения после разрыва, относительного сужения поперечного сечения после разрыва по ГОСТ 1497 и ГОСТ 10006; относительное равномерное удлинение – по ГОСТ 1497; коэффициент пластической анизотропии, показателей деформационного упрочнения и неравномерной пластической деформации – по ГОСТ 11701; истинное сопротивления разрыву – по ГОСТ 10006; твердость – по ГОСТ 2999, ГОСТ 9012, ГОСТ 9013, ГОСТ 22975, ГОСТ 23273; величины зерна – по ГОСТ 5639;

Рис. 4. Магнитная дефектоскопия

полосчатости и структурно-свободного цементита – по ГОСТ 5640; чувствительности стали к механическому старению – по ГОСТ 7268; ударного изгиба – по ГОСТ 9454; доли вязкой составляющей в изломе – по ГОСТ 10006; глубины лунки – по ГОСТ 10510; числа перегибов – по ГОСТ 13813; сплющивания – по ГОСТ 8695; угол изгиба или оценку предельной пластичности при изгибе – по ГОСТ 14019; глубину обезуглероженного слоя – по ГОСТ 1763; относительную деформацию при осадке – по ГОСТ 8817; загиб – по ГОСТ 3728 по стандартам [13–32].

Все методы магнитного контроля качества основаны на обнаружении местных изменений магнитного поля, вызванных повреждениями в намагниченном изделии (подвергаемом контролю объекте). Несплошности в магнитной проницаемости, такие как трещины, имеют гораздо более низкую проницаемость, чем сам объект. Когда они присутствуют, магнитные силовые линии искривляются, образуя поля рассеяния или дефектные поля. Эти изменения регистрируются различными магнитными преобразователями (некоторые из которых даже дают название методу контроля). Из формы и амплитуды магнитных линий можно судить о характеристиках и глубине расположения дефекта. По окончании проверки объект размагничивается с использованием соленоида.

В контроле качества листового стекла требуется исследовать такие дефекты, как пузырь (рис. 5, *а*), инородные включения, свиль, шлир (рис. 5, *б*), царапины, складки (рис. 5, *в*) и др. К методам неразрушающего контроля этих дефектов относятся оптический метод, интерференционная и поляризационная дефектоскопии, инфракрасная термография, ультразвуковой контроль, рентгенография. Рассмотрим подробнее каждый из них.

Оптические методы контроля включают в себя визуальный осмотр, интерференцион-

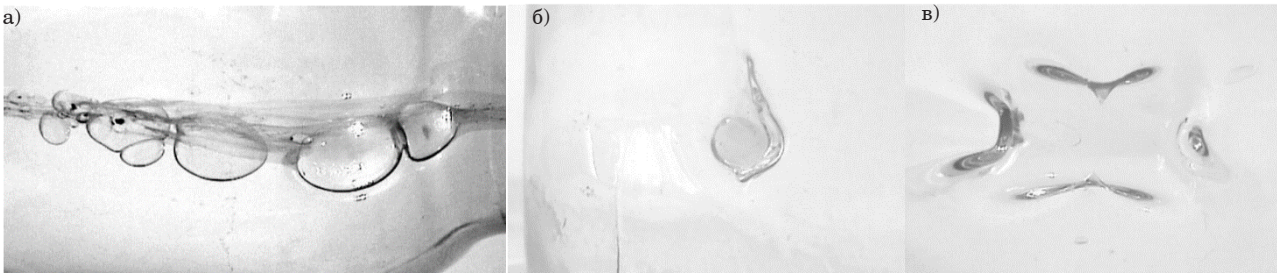


Рис. 5. Примеры дефектов стекла: а – пузырь в стекле; б – шлир; в – складка

ную и поляризационную дефектоскопию. Визуальный осмотр поверхности стекла направлен на наличие трещин, пузырей, включений и других дефектов. Является самым простым и широко используемым методом контроля стекла.

Интерференционная дефектоскопия использует электромагнитные волны видимого диапазона для обнаружения дефектов. При прохождении волны через стекло изменения в интерференционной картине свидетельствуют о наличии дефектов, таких как пузырьки или трещины, помогая определить их характеристики и размеры.

Метод помогающий определить области стекла с внутренними напряжениями или деформациями, называется, поляризационная дефектоскопия. Поляризационная дефектоскопия стекла использует эффект поляризации света для обнаружения дефектов. Путем изменения поляризации света и его пропускания через стекло получается анализировать характеристики и распределение дефектов [33].

Ультразвуковой метод контроля стекла использует высокочастотные звуковые волны, направленные через стекло. Если в материале есть дефекты, такие как трещины или включения, ультразвук отражается или рассеивается. Измеряя время прохождения и изменения в ультразвуковых волнах, можно обнаружить и оценить размеры и характер дефектов в стекле.

Инфракрасная термография стекла основана на измерении инфракрасного излучения, которое испускает стекло при изменении температуры. Дефекты или неоднородности в стекле могут изменять его тепловое излучение. Путем анализа этих изменений температуры можно обнаружить дефекты, трещины или другие аномалии в стеклянной поверхности.

Для обнаружения деформаций, дефектов структуры, неравномерности толщины или включений внутри стекла используется рентгенография. Методы проверки и исследования, направленные на выявление дефектов в композитных материалах, разделяются на несколько типов, включая те, что обнаруживают внутренние проблемы, такие как трещины, разделения и инородные частицы, и те, что выявляют поверхностные дефекты, такие как царапины, вмятины и отслоения слоев и т. д. [34]. Рис. 6 отображает примеры дефектов композитно-

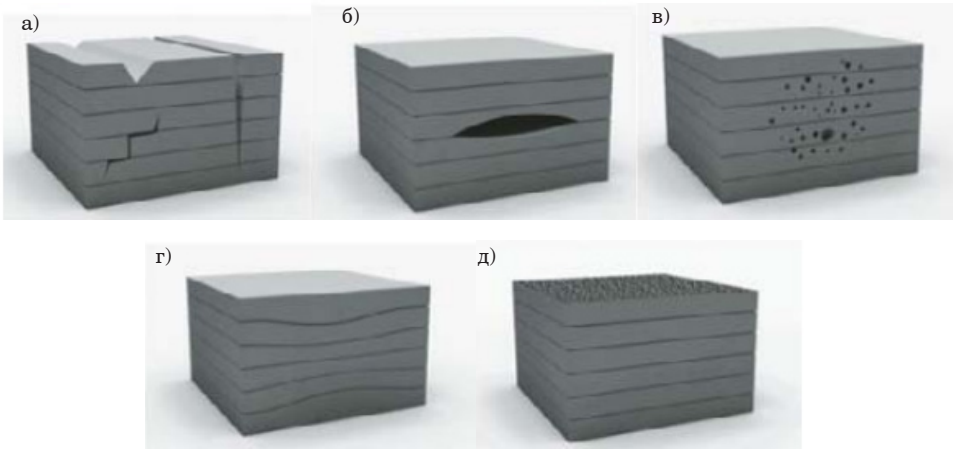


Рис. 6. Примеры дефектов композитного материала: а – трещина; б – расслоение; в – пористость; г – напряженные состояния; д – шероховатость

го материала. Методы контроля варьируются от визуально-оптических до методов, использующих акустическую микроскопию для обнаружения мельчайших несовершенств в структуре материала. Также существуют методы оценки физико-механических характеристик материалов, позволяющие прогнозировать их работоспособность в деталях или конструкциях [35].

Эхо-импульсный метод, теневой метод, методов импеданса, метод велосиметрии, методы вынужденных и свободных колебаний, реверберационный метод используются для обнаружения скрытых дефектов в материалах, включая разделения, трещины, включения, а также отслоения поверхностных слоев при обработке деталей из композиционных материалов.

Эхо-импульсный метод контроля композитных материалов основан на излучении звуковых импульсов в материал и измерении времени, за которое отраженные эхо-сигналы возвращаются обратно к датчику. Изменения во времени отражения сигнала могут указывать на дефекты.

Теневой метод контроля композитных материалов использует принцип заслонения: при пропускании света или других волн через материал, дефекты создают тени или блокируют часть сигнала. Изменения в пропускании света или волны помогают обнаружить дефекты или неоднородности в композитном материале.

Методы импеданса основаны на измерении электрических свойств материала, таких как сопротивление или емкость. Анализ изменений этих свойств позволяет обнаружить дефекты, включения и другие аномалии, поскольку они влияют на электрические характеристики композита.

Метод велосиметрии заключается в измерении скорости, с которой распространяются ультразвуковые волны в материале. Анализ отклонения скорости дает возможность детектировать дефекты.

Метод вынужденных и свободных колебаний основан на изучении реакции материала на внешние и внутренние механические воздействия. Изменения в реакции материала на эти колебания позволяет выявить дефекты.

Реверберационный метод контроля в композитных материалах использует измерение времени затухания звуковых волн, отражающихся внутри материала после того, как он был подвергнут короткому звуковому импульсу. Время затухания указывает на наличие дефектов.

Поверхностные проблемы, такие как вмятины, царапины, сколы, а также скрытые проблемы, выходящие на поверхность, индицируют через визуально-оптический контроль, в некоторых случаях через люминесцентную дефектоскопию.

Люминесцентная дефектоскопия основана на использовании световых волн определенной длины для возбуждения люминесцентного свечения в дефектах материала. При возбуждении светом дефектные области излучают свет, отличающийся от окружающего фона.

Для контроля внутренней структуры материала и выявления мелких дефектов, такие как складки, свили, отклонения угла армирования, искажения волокон в плоскости слоев и другие нарушения макроструктуры, используют методы ультразвуковой дефектоскопии [36].

В таблице приведены достоинства и недостатки рассмотренных выше методов.

В зарубежной промышленности внедряются системы контроля качества, например, компания *ISRA Vision* предоставляет различные системы машинного зрения для обнаружения дефектов на поверхности стекла (рис. 8), металла (рис. 7) и композитных материалов.

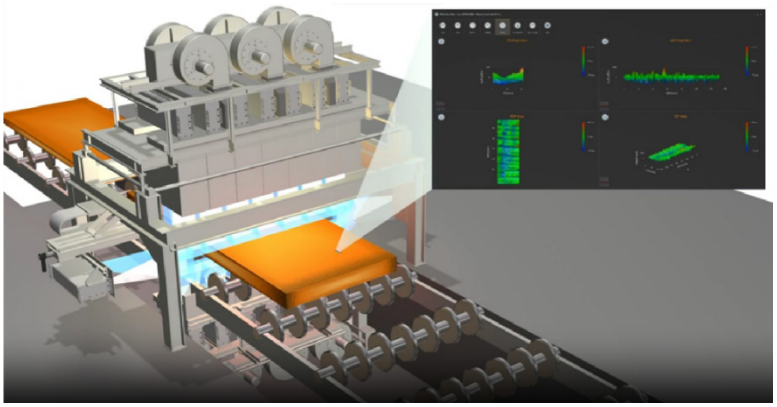


Рис. 7. Визуализация системы ISRA PARSYTEC от ISRA Vision для дефектоскопии листового металла [37]

Достоинства и недостатки методов контроля листовых материалов

Материал	Метод контроля	Достоинства	Недостатки
Металл	Ультразвуковой	1. Высокая чувствительность к различным типам дефектов. 2. Может использоваться для определения глубины дефектов. 3. Не требует поверхностной подготовки материала	1. Требует квалифицированных специалистов для выполнения контроля. 2. Зависит от точности настройки оборудования
	Вихретоковый	1. Быстрое сканирование больших поверхностей. 2. Может использоваться для контроля непроводящих материалов. 3. Не требует контакта с поверхностью	1. Менее чувствителен к малым дефектам по сравнению с ультразвуком. 2. Ограничен по глубине проникновения в материал
	Магнитный	1. Может обнаружить дефекты на значительной глубине. 2. Применим для контроля больших поверхностей. 3. Может быть автоматизирован и использован для серийного контроля	1. Ограниченный типами дефектов, которые можно обнаружить. 2. Требует специальной подготовки поверхности и магнитного поля
Стекло	Оптический	1. Прост в использовании и не требует специализированного оборудования. 2. Позволяет обнаруживать различные видимые дефекты, такие как трещины, пузыри, включения и другие поверхностные несовершенства	1. Ограничен человеческим фактором и субъективностью оценки. 2. Не всегда эффективен для обнаружения внутренних дефектов
	Интерференционный	1. Высокая чувствительность к мелким поверхностным дефектам, таким как всплески и пятна. 2. Позволяет оценить толщину и равномерность стекла	1. Требует специализированного оборудования и навыков для интерпретации результатов. 2. Менее эффективен для выявления внутренних дефектов
	Поляризационный	1. Помогает выявлять внутренние напряжения и деформации в стекле. 2. Может обнаруживать области с потенциально повышенным риском разрушения	1. Требует специальной аппаратуры и экспертизы для интерпретации результатов. 2. Не всегда обнаруживает конкретные дефекты, ограничиваясь указанием на потенциальные проблемы
	Ультразвуковой	1. Высокая чувствительность к внутренним дефектам, таким как трещины, пузыри и включения. 2. Может дать информацию о глубине дефектов	1. Требует высокой квалификации оператора и точной подготовки оборудования. 2. Могут быть трудности в обнаружении поверхностных дефектов
	Инфракрасный	1. Может выявить равномерность нагрева или охлаждения, что может указывать на дефекты или неравномерности в стекле. 2. Быстрый и не разрушающий метод контроля	1. Может требовать специального оборудования для обработки данных и интерпретации результатов. 2. Не всегда может точно определить тип или характер дефекта
	Рентгенография	1. Позволяет обнаружить внутренние дефекты и включения в стекле. 2. Может быть полезен для проверки стекла на наличие скрытых дефектов	1. Использование рентгеновского излучения может требовать специализированной техники и мер безопасности. 2. Требует специального оборудования для получения и интерпретации изображений
Композитный материал	Эхо-импульсный	1. Преимущество в точности определения геометрии и размеров дефектов. 2. Способность обнаруживать дефекты на различных глубинах в материале	1. Требует высокой точности и квалификации оператора для интерпретации результатов
	Теневой	Высокая чувствительность к различным дефектам и возможность определения их формы и расположения	Менее эффективен при выявлении мелких дефектов и может иметь ограничения в разрешении
	Импедансный	Помогает обнаруживать небольшие дефекты, так как изменения импеданса могут быть связаны с минимальными изменениями в структуре материала	Может быть чувствителен к внешним шумам или изменениям окружающей среды.

Окончание таблицы

Материал	Метод контроля	Достоинства	Недостатки
	Велосиметрический	Относительно быстрый контроль на предмет наличия дефектов	Требует калибровки и точной установки параметров для получения точных результатов
	Метод вынужденных колебания	Позволяет исследовать динамические свойства материала, что полезно при обнаружении скрытых дефектов	Зависимость результатов от внешних воздействий, что может усложнить интерпретацию данных.
	Метод свободных колебания	Способствует оценке механических свойств материала на основе его натурных колебаний, что помогает обнаруживать дефекты	Может требовать специальных условий и длительного времени для получения репрезентативных данных
	Реверберационный	Требует минимальной подготовки и позволяет автоматизировать процесс контроля	Может быть менее эффективен в обнаружении поверхностных дефектов из-за ограничений в глубине проникновения сигнала
	Визуально-оптический	1. Для осуществления такого контроля не требуется использование дорогостоящего специализированного оборудования. 2. С помощью визуально-оптического контроля можно быстро обнаружить трещины, сколы, вмятины и другие поверхностные дефекты.	1. Оптический метод не всегда позволяет обнаружить дефекты, скрытые под поверхностью материала. 2. Результаты визуального контроля могут зависеть от субъективного мнения инспектора, что может привести к неправильной интерпретации класса дефекта. 3. В некоторых случаях, например, при работе в слабоосвещенных помещениях или на сложных поверхностях, визуальный контроль может быть затруднен
	Люминесцентное дефектоскопирование	Позволяет проводить контроль на относительно больших поверхностях материала за сравнительно короткое время.	1. Может потребоваться специальная подготовка поверхности, например, очистка от загрязнений или нанесение флуоресцентных красителей, что может потребовать дополнительного времени и затрат. 2. При изменении условий освещенности флуоресцентный контроль может быть затруднен из-за слабости эффекта флюоресценции
	Ультразвуковой	1. Обладает высокой чувствительностью к дефектам внутри материала, позволяя обнаруживать как поверхностные, так и внутренние дефекты, такие как трещины, включения, поры и другие неоднородности. 2. Позволяет точно определить местоположение и размеры обнаруженных дефектов в материале.	Для эффективного использования этого метода требуется специальное обучение и опыт персонала

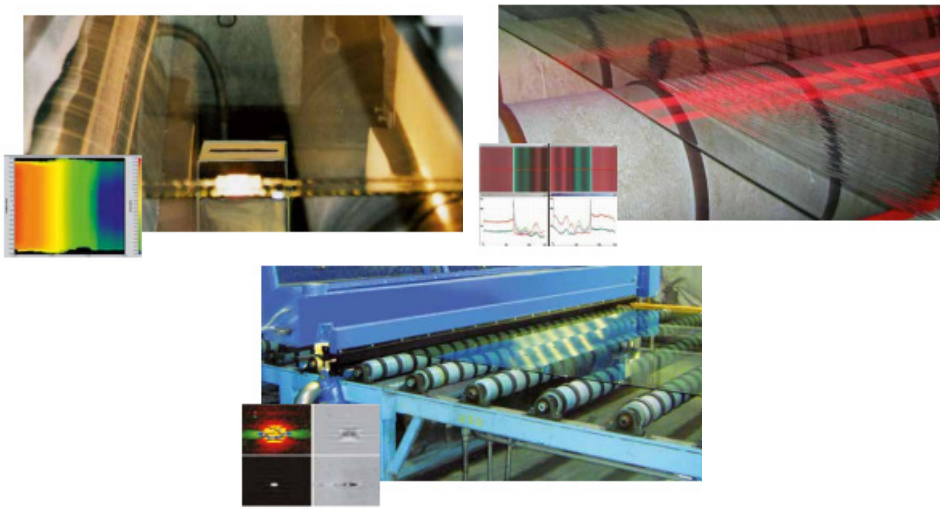


Рис. 8. Визуализация системы ISRA GLAS от ISRA Vision для дефектоскопии листового стекла [37]

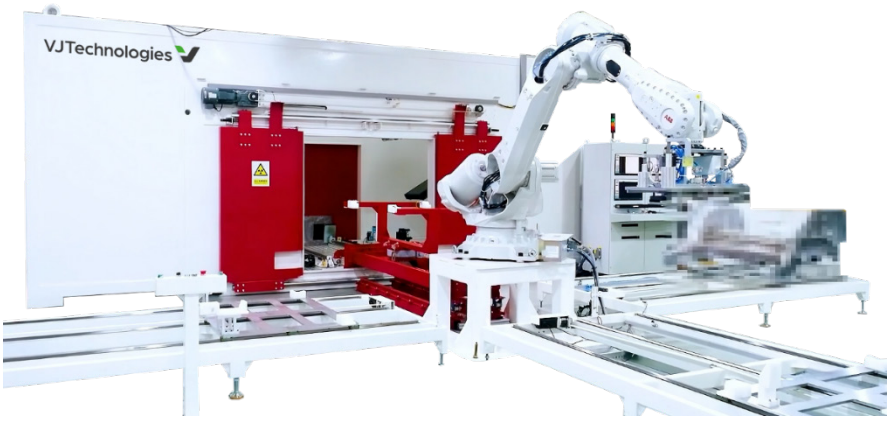


Рис. 9. Цифровая рентгеновская система XXL DR (dual robot) компании VJ Technologies

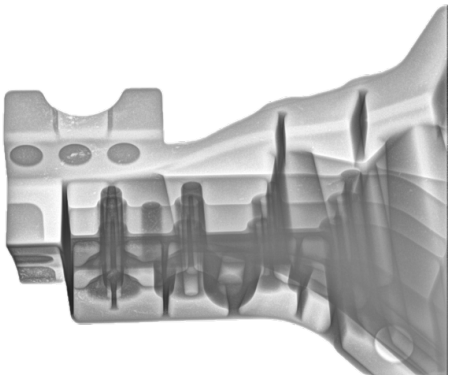


Рис. 10. Пример отсканированной детали цифровой рентгеновской системой XXL DR

Рис. 11. Конфокальный датчик FocalSpec LCI1220 High Speed 3D Line Confocal Sensors

Программное обеспечение *VJ Technologies* для автоматического распознавания дефектов (ADR) в автомобильной промышленности и программное обеспечение ADR в аэрокосмической области предназначенный для оптимизации алгоритмов автоматического отзыва деталей, ограничения количества ложных срабатываний и сокращения брака [38].

Цифровая рентгеновская система (рис. 10) XXL DR (dual robot) (рис. 9) компании *VJ Technologies* оснащена двумя роботами. Эта система предназначена для сканирования деталей размером до 1,7×1,6×0,8 м. Функция отслеживания/зеркального отображения позволяет оператору легко программировать несколько точек контроля.

Конфокальные датчики FocalSpec LCI1220 High Speed 3D Line Confocal Sensors (рис. 11) от компании *LMI Technologies* используются только для контроля различных сложных типов поверхностей (рис. 12), включая поверхности с изогнутыми краями, прозрачные многослой-

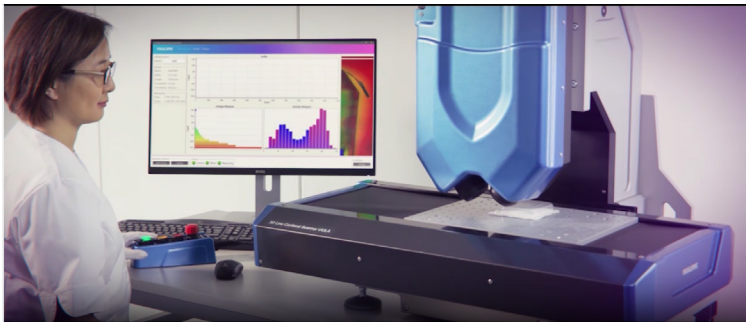


Рис. 12. Пример использования конфокального датчика FocalSpec LCI1220 High Speed 3D Line Confocal Sensors

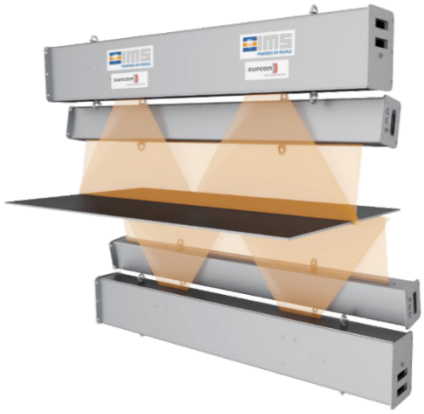


Рис. 13. Визуализация системы контроля поверхности Surcon 2D

ные поверхности и поверхности с высокой отражающей способностью [39].

Системы контроля поверхности Surcon 2D (рис. 13) от *IMS* для регистрации и визуализации дефектов и аномалий в режиме онлайн, а также их классификация на сталелитейных производствах [40].

В статье проведен анализ методов контроля листовых материалов. Выявлены преимущества и недостатки методов. Обнаружено, что большинство систем контроля не позволяют осуществлять процедуру классификации дефектов. Перспективным является изучение применения комбинаций методов контроля и разработка модульного оборудования для проведения контроля, поиска и классификации дефектов в режиме реального времени.

Список источников

1. Современное состояние неразрушающего контроля механических свойств и штампуемости листового проката сталей в технологическом потоке производства / В. Ф, Матюк, С. А. Гончаренко, Х. Хартманн, Х. Райхельт // Дефектоскопия. 2003. № 5. С. 19–60.

2. *Злобина С. И., Леписа Л. В.* Статистический контроль прочностных и пластических свойств проката из углеродистой стали // Заводская лаборатория. 1992. Т. 58, № 7. С. 61.

3. *Корхин А. С.* Статистический контроль механических свойств металлопродукции (динамический подход) // Заводская лаборатория. 1995. Т. 61, № 5. С. 51–58.

4. Контроль качества металлопродукции по корреляционной связи между параметрами (обобщающая статья) / В. П. Сударев, Е. А. Демидович, П. И. Ковалев, Л. И. Новицкий // Заводская лаборатория. 1992. Т. 58, № 1. С. 67–74.

5. *Клюев В. В.* Неразрушающий контроль: справочник. Машиностроение, 1990–2000, С. 616.

6. *Мельгуй М. А.* Магнитный контроль механических свойств сталей. Минск: Наука и техника, 1980. С. 184.

7. *Михеев М. Н., Горкунов Э. С.* Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993. С. 250.

8. *Ермолов И. Н., Алешин Н. П., Потапов А. И.* Неразрушающий контроль: в 5 кн. Кн. 2: Акустические методы контроля: практ. пособие / под ред. В. В. Сухорукова. М.: Высш. шк., 1991. С. 283.

9. *Герасимов В. Г., Покровский А. Д., Сухоруков В. В.* Неразрушающий контроль: в 5 кн. Кн. 3: Электромагнитный контроль: практ. пособие / под ред. В. В. Сухорукова. М.: Высш. шк., 1992. С. 312.

10. Magnetische und akustische Verfahren zur Materialcharakterisierung Stah1blechen / M. Borsutzki, J, Kroos, W. Reimche, E. Schneider. Stahl u. Eisen, 2000, Hf. 12. S. 115–121.

11. ГОСТ 22727–88. Прокат листовой. Методы ультразвукового контроля. М.: Изд-во стандартов, 1988–15 с.

12. ГОСТ Р ИСО 15549–2009. Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. М.: Стандартинформ, 2011. 8 с.

13. ГОСТ 30415–96. Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом. М.: Изд-во стандартов, 2004. 12 с.

14. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Стандартинформ, 2008. 24 с.

15. ГОСТ 10006-80. Трубы металлические. Метод испытания на растяжение. М.: Стандартинформ, 2010. 206 с.

16. ГОСТ 11701-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. М.: Издательство стандартов, 1984. 15 с.

17. ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. М.: Изд-во стандартов, 1987. 30 с.

18. ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. М.: Стандартинформ, 2007. 5 с.

19. ГОСТ 9013-59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. М.: Изд-во стандартов, 2001. 6 с.

20. ГОСТ 22975-78. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу при малых нагрузках (по Супер – Роквеллу). М.: Госстандарт России, 1992. 11 с.

21. ГОСТ 23273-78. Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка (по Шору). М.: Изд-во стандартов, 1985. 3 с.

22. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. М.: Изд-во стандартов, 2003. 16 с.

23. ГОСТ 5640-68. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты. М.: Изд-во стандартов, 1988. 8 с.

24. ГОСТ 7268-82. Сталь. Метод определения склонности к механическому старению по испытанию на ударный изгиб. М.: Из-тво стандартов, 2002. 3 с.

25. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. М.: Изд-во стандартов, 2003. 9 с.

26. ГОСТ 10510-80. Металлы. Метод испытания на выдавливание листов и лент по Эриксену. М.: Изд-во стандартов, 1993. 6 с.

27. ГОСТ 13813-68. Металлы. Метод испытания на перегиб листов и лент толщиной менее 4 мм. М.: Изд-во стандартов, 1999. 6 с.

28. ГОСТ 8695-75. Трубы. Метод испытания на сплющивание. М.: Стандартинформ, 2010. 150 с.

29. ГОСТ 14019-80. Металлы. Методы испытания на изгиб. М.: Изд-во стандартов, 1991. 8 с.

30. ГОСТ 1763-68. Сталь. Методы определения глубины обезуглероженного слоя. М.: Изд-во стандартов, 1988. 20 с.

31. ГОСТ 8817-82. Металлы. Метод испытания на осадку. М.: Изд-во стандартов, 1987. 3 с.

32. ГОСТ 3728-78. Трубы. Метод испытания на загиб. М.: Стандартинформ, 2010. 154 с.

33. *Беляев К. В., Серебренников В. С.* Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие. 2018.

34. *Андреев И. Д., Лобанова И. С.* Методы неразрушающего контроля изделий из полимерных композитных материалов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. С. 295–296.

35. *Алешин Н. П., Григорьев М. В., Щипаков Н. А.* Современное оборудование и технологии неразрушающего контроля ПКМ // Инженер. вестн. 2015. № 1. С. 233–538.

36. *Мурашов В. В., Румянцев А. Ф.* Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композитных материалов и методы их выявления. Ч. 2: Методы выявления дефектов монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композитных материалов // Контроль. Диагностика. 2007. № 5. С. 1–19.

37. ISRA VISION. URL: https://www.isravision.com/en-en/industries/metal/steel (дата обращения: 10.11.2023).

38. XXL DUAL Robot Digital X-ray system. URL: https://vjt.com/products/xxl-dual-robot/ (дата обращения: 12.11.2023).

39. FocalSpec. URL: https://lmi3d.com/focalspec-high-speed-line-confocal-sensors/ (дата обращения: 10.11.2023).

40. SURCON 2D. URL: https://www.ims-experts.com/en/measuring-system/surface-inspection-system-surcon-2d-metal-service-centres/ (дата обращения: 14.11.2023).

УДК 621.311.236+658.513 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-228-231**

М. С. Романова*
старший преподаватель
И. В. Елтышева*
старший преподаватель
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РАЗРАБОТКА КОНФИГУРАТОРА ВЫБОРА УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ДЛЯ ШКАФА КОМПЛЕКТНО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Рассматривается возможность автоматизировать процесс подбора и выбора оборудования релейной защиты и автоматики для шкафов комплектных распределительных устройств. Рассмотрена перспектива использования данной технологии для комплектации всего шкафа со всеми электротехническими продуктами, такими как выключатели, трансформаторы тока, делители напряжения, ограничители перенапряжения, заземлители, трансформаторы тока и др.
Ключевые слова: *жизненный цикл, автоматизация, электроэнергетическое устройство, релейная защита и автоматика, конфигуратор.*

M. S. Romanova*
Senior Lecturer
I. V. Eltyisheva*
Senior Lecturer
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DEVELOPMENT OF A CONFIGURATOR FOR SELECTING A RELAY PROTECTION AND AUTOMATION DEVICE FOR A SWITCHGEAR CABINET

This article discusses the possibility of automating the process of selection and selection of relay protection and automation equipment for switchgear cabinets. The prospect of using this technology to complete the entire cabinet with all electrical products, such as switches, current transformers, voltage dividers, surge suppressors, grounding switches, current transformers and others is considered.
Keywords: *life cycle, automation, electrical power device, relay protection and automation, configurator.*

Изготовление комплектно распределительного устройства (КРУ) – это процесс создания специализированной системы, которая позволяет эффективно распределять и контролировать электроэнергию в различных электрических схемах.

Для изготовления распределительного устройства требуется выполнить несколько этапов.

Проектирование – на этом этапе разрабатывается детальное техническое задание и проводится расчет системы, чтобы определить ее главные параметры, такие как мощность, напряжение, количество выходов и т. д. Также производится выбор оборудования и его расположение в устройстве.

Изготовление корпуса – комплектное распределительное устройство обычно размещается в специальном корпусе или шкафу. Для его изготовления используются металлические или пластиковые материалы. Необходимо учесть требования безопасности, климатические условия и электромагнитную совместимость при изготовлении корпуса.

Монтаж оборудования на этом этапе проводится сборка устройства с использованием выбранного оборудования, такого как автоматические выключатели, предохранители, контакторы и другие электрические компоненты. Важно соблюдать все технические требования и правила безопасности при выполнении монтажа.

Подключение к электрической сети – после сборки и монтажа устройства его необходимо подключить к электрической сети. Для этого проводятся работы по подключению кабелей и проводов к соответствующим входам и выходам устройства. Важно соблюдать все правила электробезопасности при проведении этих работ.

Тестирование и наладка – после подключения устройства проводится его тестирование для проверки его функциональности и соответствия заданным параметрам. Результаты тестирования обрабатываются и, при необходимости, корректируются настройки устройства.

Оформление документации – после завершения работы по изготовлению комплексно распределительного устройства составляются соответствующие техническая документация и паспорт устройства. Это позволяет иметь все необходимые данные для последующей эксплуатации и обслуживания устройства.

Весь процесс изготовления комплектно распределительного устройства должен выполняться специалистами с соответствующими знаниями и опытом в области электротехники.

Описанные процессы представляют собой жизненный цикл распределительного устройства, где эффективное управления каждым этапом жизненного цикла позволяет получить на выходе качественное, отвечающее основным техническим требованиям устройство.

Предприятию-изготовителю приходит техническое задание от заказчика, содержащее как правило однолинейную схему участка подключение и общие технические требования к устройствам.

На основании данных требований инженеры-схемотехники, инженеры-конструкторы и инженеры-проектировщики разрабатывают шкаф со всеми комплектующими.

Для автоматизации работы всех задействованных лиц и отделов удобно осуществлять ее в едином информационном окне.

Рассмотрим одну из возможных автоматизированных систем жизненного цикла. PLM-(Product Lifecycle Management) система – это программное обеспечение, которое помогает организациям управлять жизненным циклом своих продуктов, от начальной идеи до конечного изделия и его утилизации.

PLM-система предоставляет инструменты для управления всеми этапами разработки продукта, включая планирование, конструирование, анализ, производство, тестирование, управление документацией и т. д. Важной функцией PLM-системы является централизованное хранение и управление данными о продукте, такими как чертежи, спецификации, стандарты, схемы и другие документы.

PLM-системы также позволяют автоматизировать процессы обмена информацией между различными отделами и сотрудниками, обеспечивая лучшую коммуникацию и сотрудничество. Они позволяют отслеживать изменения, вносимые в продукт на разных его этапах, и управлять версиями, что помогает предотвратить ошибки и улучшить качество продукта.

PLM-системы повышают эффективность работы организации, сокращают время на разработку и выпуск новых продуктов на рынок, снижают издержки и улучшают конкурентоспособность. Они также способствуют более эффективному использованию ресурсов и обеспечивают лучшую отслеживаемость продукта на протяжении всего его жизненного цикла.

Конфигуратор для ячеек КРУ должен содержать информацию о типе выключателя, трансформатора тока, трансформатора напряжения, устройств релейной защиты и автоматики, счетчиках электроэнергии, наличия дополнительных устройств.

Рассмотрим конфигуратор для релейной зашиты и автоматики, созданный в 1С, – Appius-PLM. Для удобства возьмем два крупнейших производителя блоков релейной зашиты и автоматики – это «БМРЗ» и «ЭКРА» [1, 2].

Сначала необходимо выбрать производителя, обычно он указывается в техническом задание или подбирается инженером по технико-экономическим показателям (рис. 1).

После выбора производителя переходим к непосредственному заполнению свойств блока (рис. 2; 3).

Отметим, что блоки имеют основные и дополнительные параметры. Заполнение основных параметров обязательно. Дополнительные указываются, если есть сведения в технической документации.

Важно отметить, что не все дополнительные параметры будут указаны в полном наименовании изделия. Они будут сообщаться пользователю дополнительно (рис. 4).

После ввода всех данных, получаем следующий тип блока (рис. 5).

На все переменные значения (дополнительные или основные) накладывались условия, согласно руководством по эксплуатации от завода изготовителя.

Такие, например, как номер базового функционального программного обеспечения, для блока БМРЗ-152 существует ряд ограниченных значений.

Программа подсказывает верное число и проверяет блок на корректность заполнения, пример на следующем рисунке (рис. 6).

Рис. 1. Выбор производителя

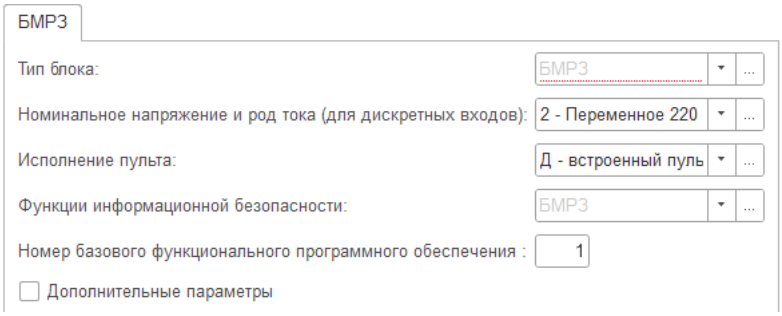


Рис. 2. Ввод основных параметров блока

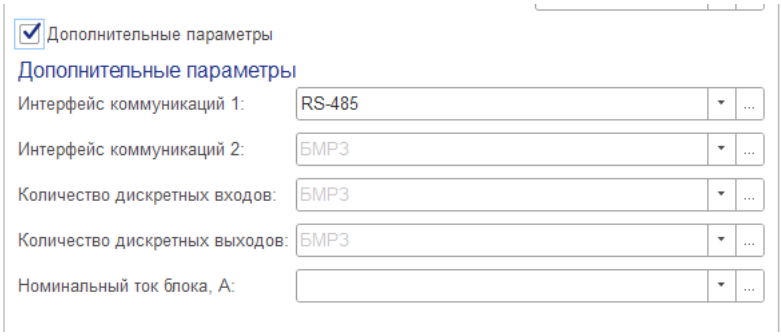


Рис. 3. Ввод добавочных параметров

Производитель		
Тип блока	Тип блока	БМРЗ-152
Номинальное напряжение и...	Номинальное напряжение и род тока (для дис...	2 - Переменное 220 В, постоянное 220 В
Исполнение пульта	Исполнение пульта	Д - встроенный пульт с монохромным дисп...
Номер базового функциона...	Номер базового функционального программн...	53
Интерфейс коммуникаций 1	Интерфейс коммуникаций 2	RS-485
Дополнительные параметры	Дополнительные параметры	Нет
Протоколы информационно...	Протоколы информационного обмена	
Количество дискретных вхо...	Количество дискретных входов	
Номинальный ток блока, А	Номинальный ток блока, А	0
Количество дискретных вых...	Количество дискретных выходов	
Функции информационной ...	Функции информационной безопасности	не поддерживаются
Номер ФИБ	Номер ФИБ	
Защищаемое присоединение	Защищаемое присоединение	(ВВ) Выключатель Ввода
Интерфейс коммуникаций 2	Интерфейс коммуникаций 1	О - оптический интерфейс

Рис. 4. Введенные значения

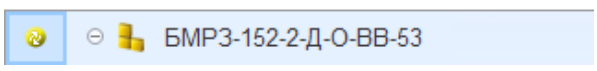


Рис. 5. Результат

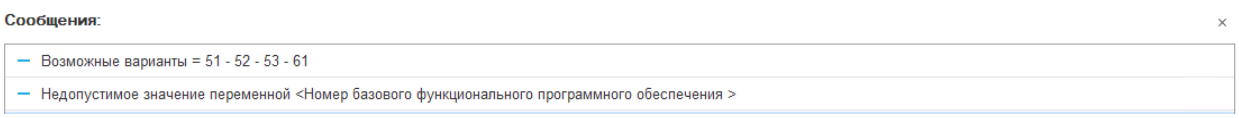


Рис. 6. Всплывающее окно об ошибках системы

Все переменные создавались с определенными условиями, которые прописывались в свойствах. Написание условий происходило в виде логических переменных – И, ИЛИ, ИНАЧЕЕСЛИ, ЕСЛИ. Для получения результата создавался код, который содержит в себе информацию по каждому блоку от двух производителей, включая основные и добавочные переменные (рис. 5).

Введенная в единую авторизированную систему информация от инженера-схемотехника поступает дальнейшим отделам мгновенно. Соответственно, данная процедура упрощает и ускоряет процесс изготовления всего устройства в целом, а также содержит основную информацию из технического задания заказчика, что в свою очередь, уменьшает вероятность возникновения ошибки (так как документ просматривается изначально инженером-схемотехником, из него выбирается нужная информация и вводится в автоматизированную систему в полном объеме, инженеру производственного отдела нет необходимости открывать исходный файл и искать нужную информацию) [3,4].

Перспектива развития такого конфигуратора для всего шкафа ускорит и упростит процесс подготовки проектного решения инженерного отдела, что, в свою очередь, скажется на уменьшенит сроков изготовления и автоматизации взаимодействия отделов.

Список источников

1. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ: руководство по эксплуатации. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.mtrele.ru/files/filedoc/releynaya-zashita/bmrz/bmrz-m4.pdf (дата обращения: 11.11.2023).

2. Терминал защит, автоматики, управления выключателем и сигнализации кабельной или воздушной линии, линии К ТСН ЭКРА 217(А): руководство по эксплуатации. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ekra.ru/upload/iblock/592/%D0%A0%D0%AD%20%D0%AD%D0%9A%D0%A0%D0%90%D0%2021 7(%D0%90)%200301.pdf (дата обращения: 11.11.2023).

3. Электротехнический справочник: в 3 т. Т. 2: Электротехнические устройства / под общ. ред. проф. МЭИ В. Г. Герасимова [и др.]. 6-е изд., испр. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 640 с.: ил.

4. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. URL: https://tech-expo.ru/pue/ (дата обращения: 12.11.2023).

УДК 621.316.1 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-232-235**

Н. Г. Семенова*
доктор педагогических наук, кандидат технических наук
А. А. Дьяконов*
преподаватель
** Оренбургский государственный университет*

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ СТРУКТУРЫ ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПО ЛИКВИДАЦИИ НАРУШЕНИЙ НОРМАЛЬНОГО РЕЖИМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Рассмотрены основные этапы процесса принятия решения по выбору оптимальной топологии распределительной сети после аварийного режима. Предложено поиск оптимальной топологии распределительной сети с локализацией поврежденного оборудования осуществлять посредством генетического алгоритма, особью которого является топология распределительной сети, представленной в виде двоичного кода, а в качестве функций скрещивания выбраны cross-функции.
Ключевые слова: *система поддержки принятия решений, распределительные сети, ликвидация нарушений нормального режима, генетический алгоритм.*

N. G. Semenova*
Dr. Sc., Pedagogics, PhD, Tech.
A. A. Deaconov*
Lecturer
** Orenburg State University*

THE MAIN STAGES OF THE STRUCTURE OF THE DECISION-MAKING PROCESS FOR THE ELIMINATION OF VIOLATIONS OF THE NORMAL FUNCTIONING OF THE DISTRIBUTION NETWORK

The main stages of the decision-making process for choosing the optimal topology of the distribution network after an emergency are considered. It is proposed to search for the optimal topology of the distribution network with localization of damaged equipment by means of a genetic algorithm, the individual of which is the topology of the distribution network, represented as a binary code, and cross-functions are selected as crossing functions.
Keywords: *decision support system, distribution networks, elimination of violations of the normal regime, genetic algorithm.*

На основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Об Энергетической стратегии РФ на период до 2035 года» приоритетом государственной энергетической политики является гарантированное обеспечение энергетической безопасности страны в целом и на уровне субъектов Российской Федерации [1]. Согласно статистике, в электроэнергетической области, до 17 % аварий происходит из-за некорректных действий и решений, принимаемых оперативно-диспетчерским персоналом. Для нивелирования указанных некорректностей в настоящее время наметилась тенденция внедрения в оперативно-технологические управления автоматизированных систем поддержки принятия решений (СППР) по ликвидации нарушений нормального режима работы электроэнергетических объектов и создания оптимальной конфигурации (топологии распределительной сети) с локализацией поврежденного оборудования.

Анализ научно-технической литературы в области теории принятия решения, позволил авторам сформулировать четыре основных этапа процесса принятия решения по ликвидации нарушений послеаварийного режима. К ним отнесены: формирование базы данных электроэнергетического объекта; формирование альтернатив послеаварийного режима, оценка альтернатив, выбор наилучшей альтернативы послеаварийного режима, обеспечивающей оптимальную конфигурацию распределительной сети.

Кратко охарактеризуем каждый этап принятия решения.

1. Формирование базы данных электроэнергетического объекта. На первом этапе выделены следующие операционные действия: ввод информации о параметрах режима; расчет установившихся режимов работы.

1.1. *Ввод информации о параметрах режима.*

В работе предложена следующая классификация основных типов объектов.

1. Узлы. Трансформаторные подстанции, распределительные пункты, вводно-распределительные устройства, секции шин.

2. Связи. Воздушные, кабельные, кабельно-воздушные линии электропередач, состоящие из отдельных участков с траекторией и условиями прокладки.

3. Оборудование. Силовые трансформаторы, масляные, воздушные, вакуумные выключатели, выключатели нагрузки, разъединители, трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, устройства компенсации реактивной мощности, заземляющие устройства.

4. Устройств релейной защиты и автоматики (РЗиА).

5. Режим. Потребители, автоматизированная система диспетчерского управления (АСДУ), техническая и эксплуатационная документация.

В СППР объекты идентифицируются индивидуальным кодом (ObjectID), который формируется автоматически с присвоением типа (ObjectType). Связи между объектами представляются в виде иерархической структуры.

1.2. *Расчет установившихся режимов работы.*

Определение потерь мощности в исходной топологии распределительной сети осуществляется по методу Ньютона – Рафсон основанном на итерационном приближении решения нелинейных уравнений [2, 3]. Так как линии электропередач в электроэнергетике являются нелинейными сетями, то их расчет осуществляется посредством разбиения на участки и их линеаризация. В этом случае значения напряжений, токов, мощностей определяются на каждом участке:

$$\Delta P_i = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_{\text{ном}}^2} r_i; \quad \Delta Q_i = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_{\text{ном}}^2} x_i;$$

$$S_i^{/} = P_i^{/} + Q_i^{/} = P_i + \Delta P_i + j(Q_i + \Delta Q_i);$$

$$S_{i-1}^{//} = P_{i-1}^{//} + Q_{i-1}^{//} = P_i + P_{i-1} + j(Q_i + Q_{i-1}),$$

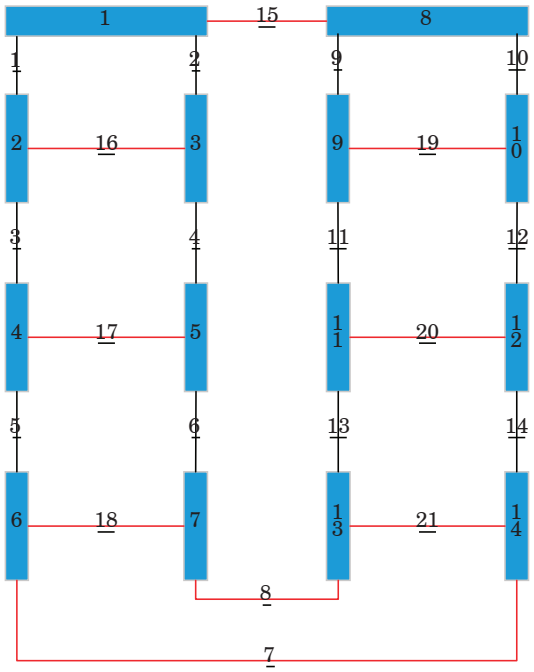


Рис. 1. Граф исходной распределительной сети

где S_i – мощность в начале i-го участка; S_{i-1} – мощность в конце $(i–1)$-го участка.

2. Формирование альтернатив послеаварийного режима. Формирование альтернатив осуществляется с помощью метода полного перебора, а именно алгоритма поиска в ширину, использующего теорию графов для представления топологии распределительной сети (РС). На рис. 1 показан граф исходной распределительной сети, вершинами которого являются секции шин, ребрами – линии электропередач (черным цветом показаны линии нормально включенные, а красным – нормально отключенные).

При заданных параметрах алгоритм поиска воссоздает топологию распределительной сети из вершин графа, не образуя при этом замкнутых контуров.

3. Оценка альтернатив. В качестве системы частных критериев оценки альтернатив выбора оптимальной топологии РС предложено использовать следующие критерии: количество оперативных переключений в электрических сетях; объем текущего резерва; отклонение напряжения; потери активной мощности; надежность ремонтных схем, социальная значимость объекта.

4. Выбор наилучшей альтернативы. Ввиду того, что многокритериальное оценивание во многих исследованиях рассматривается

как оптимизационная задача, то ранжирование альтернатив предложено осуществлять по значению целевой функции:

$$Z(k_1, k_2, k_3 \dots k_n) \rightarrow \text{extr},$$

где $k_1, k_2, k_3 \dots k_n$ – частные критерии оценки альтернативы выбора оптимальной топологии РС.

Так как основным предназначением СППР является представление аргументированной информации руководителю (начальнику) службы оперативно-технологического управления по выбору оптимальной топологии распределительной сети после аварии, поэтому результат, предложенный СППР, является лишь технической поддержкой. Окончательное принятие решения остается за руководителем.

Реализацию рассмотренных этапов СППР предложено осуществить посредством генетического алгоритма [4]. На рис. 2 показана обобщенная блок-схема реализации генетического алгоритма поиска оптимальной топологии распределительной сети с локализацией поврежденного (отключенного) оборудования.

Начальная популяция формируется из особей с зашифрованным двоичным кодом топологии РС. Особь представлена в виде хромосомы – список из N значений, где N – количество всех распределительных сетей: 1 – РС включена, 0 – РС отключена. Таким образом, каждая особь в виде 0 и 1 длиной N содержит в себе информацию о топологии распределительной сети. Особь представлена в виде двоичного кода: 11111100111111000000 и графа вершинами которого являются секции шин, ребрами – РС .

Условием добавления в начальную популяцию является отсутствие циклов (сохраняется радиальная топология распределительной сети), а также, если полученная особь не была найдена ранее.

Параметрами генетического алгоритма являются размер популяции, вероятность скрещивания и мутации, максимальное число поколений. Как правило, размер популяции приравнивается к размеру начальной популяции.

Функции скрещивания. В алгоритме применяются функции скрещивания cross1 и

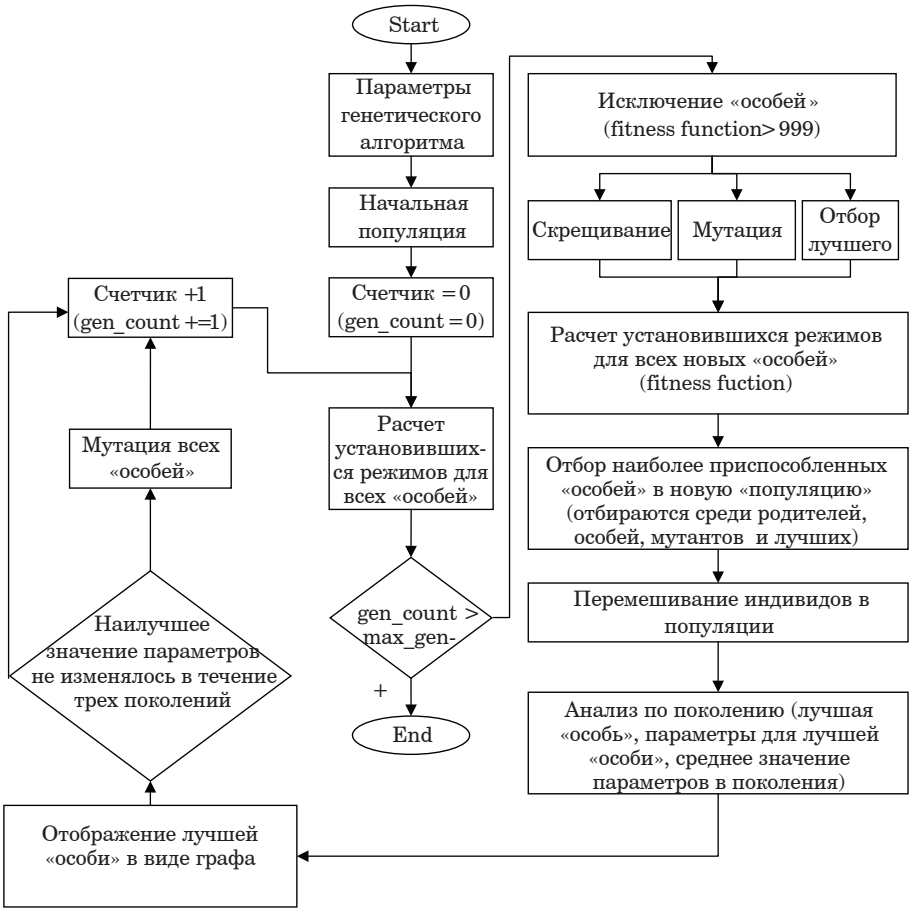


Рис. 2. Блок-схема генетического алгоритма поиска оптимальной топологии распределительной сети

cross2. Cross1 – обычное одноточечное скрещивание. Из популяции выбираются два родителя, определяется точка деления их хромосом. Совокупность левой части первого родителя и правой части второго родителя определяет особь первого потомка, а обратная совокупность – особь второго потомка. После чего особи проходят проверку на радиальную структуру и отсутствие в списке поколений. В случае успеха особь добавляется в список поколений. Cross2 – обычное двухточечное скрещивание. Аналогично скрещиванию cross1 выбираются родительские особи, но определяются две точки деления родительских хромосом, а не одна. Родительские хромосомы «перекручиваются» в этих точках и получаются потомки, которые также проходят проверку на радиальную структуру и отсутствие в списке поколений.

Функция мутации с выбранной вероятностью изменяет одну особь, у которой инвертируется один бит (ген), другими словами включается или отключается РС. При этом возможно образование цикла (кольца), тогда выбирается РС с наибольшим сопротивлением и отключается, либо прерывается связь с источником питания, тогда для обеспечения включается РС с наименьшим сопротивлением.

Функция отбора лучших особей. В начале каждого поколения (каждой итерации) до скрещивания выбирается лучшая особь. Она заносится в список лучших, для отслеживания изменений приспособленности потомков. В случае отсутствия изменений приспособленности у особей в течение 3 поколений, происходит массовая мутация, которая применяется ко всем без исключения особям популяции. Данная функция необходима для минимизации возможности зависания в локальном оптимуме.

После итерации (смены поколения) происходит анализ поколений. Выбирается самая приспособленная особь в популяции; средняя приспособленность популяции; лучшая особь с наименьшим изменением в хромосоме; лучшие особи на протяжении всех поколений.

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Предложены четыре этапа процесса принятия решения по ликвидации нарушений нормального режима функционирования распределительной сети: формирование базы данных электроэнергетического объекта; формирование альтернатив послеаварийного режима, оценка альтернатив, выбор наилучшей альтернативы послеаварийного режима, обеспечивающей оптимальную конфигурацию распределительной сети.

2. Поиск оптимальной топологии распределительной сети с локализацией поврежденного оборудования предложено осуществлять с использованием генетического алгоритма, особью которого является топология распределительной сети, представленная в виде двоичного кода, а в качестве функций скрещивания выбраны cross-функции.

Список источников

1. Распоряжение РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202006110003?ysclid=ln60uu4nt9274871928 (дата обращения: 12.03.2023).

2. *Скорняков А. Ю.* Разработка и реализация алгоритмов для управления послеаварийными режимами в электрических сетях 6–10 кВ: дис. … канд. техн. наук. М., 2011. 163 с.

3. *Домышев А. В.* Оптимизация нормальных электрических режимов электроэнергетических систем при оперативном и автоматическом управлении: дис. … канд. техн. наук. Иркутск, 2020. 187 с.

4. *Дьяконов А. А., Семенова Н. Г.* Оптимизация топологии электрической сети 6–10 кВ на основе генетических алгоритмов // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: тр. XIV Всерос. науч.-техн. конф. Оренбург: ОГУ, 2023. С. 261–265.

УДК 658.51 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-236-240**

П. А. Сергеев*
аспирант
А. П. Бобрышов*
аспирант, ассистент
С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ ФАКТОРОВ НА РАЗВИТИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Электронная промышленность является одной из наиболее важных отраслей государственной экономики в сегодняшнем мире. Учитывая современное технологическое развитие цифровой электроники и актуальную тенденцию цифровизации практических всех отраслей деятельности, направленных на развитие и функционирование государства, электронную промышленность сегодня можно выделить на особое по степени важности место. Для Российской Федерации (РФ) данный факт подтверждается национальный проектом «Цифровая экономика» от 4 июня 2019 г., утвержденный протоколом заседания президиума Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам [1]. В данной статье рассматриваются внешние и внутренние причины, влияющие на технологическую и экономическую составляющие производства электронной промышленности РФ. В работе приведены исследования на тему оценки степени влияния описанных факторов, основываясь на данных, полученных от профильной производственной организации.
Ключевые слова: *электронная промышленность, менеджмент, производство, финансирование, промышленные заказы, экономика, фонд.*

P. A. Sergeev*
PhD Student, Assistant
A. P. Bobryshov*
PhD Student, Assistant
S. V. Solyonyj
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

STUDY OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL AND INTERNAL FACTORS ON THE DEVELOPMENT OF PRODUCTION IN THE ELECTRONICS INDUSTRY

The electronic industry is one of the most important sectors of the economy in the modern world. Taking into account the modern technological development of digital electronics and the current trend of digitalization of almost all branches of activity aimed at the development and functioning of the state, the electronic industry today can be allocated a special place in importance. For the Russian Federation (RF), this fact is confirmed by the national Digital Economy Project dated June 4, 2019, approved by the minutes of the meeting of the Presidium of the Presidential Council for Strategic Development and National Projects [1]. This article examines the external and internal factors affecting the technological and economic component of the production of the electronic industry of the Russian Federation. The article presents a study on the topic of assessing the degree of influence of the described factors, based on data obtained from a specialized production organization.
Keywords: *electronic industry, management, production, financing, industrial orders, economics.*

Причины низких финансовых показателей отечественной электронной промышленности

Ко внешним причинам низких финансовых показателей чаще всего относят отставание отечественных компаний по объемам и качества производства электронной продукции от мировых лидеров. Еще одной причиной слабого развития и объемов продажи является низкая инвестиционная привлекательность, чаще всего ориентируемая на выход компании на самоокупаемость в течение семи лет. При этом стоит отметить еще одну озвучиваемую причину, свя-

занную с технологичностью и характеристиками выпускаемой продукции. Закупку импортной электронной продукции без производства собственной относят к более простому решению по причине простоты и отсутствия необходимости выделения большого объема финансовых средств на производство отечественных компонентов. Как вытекающая и занимающая особое место в причинах недостаточного финансового роста электронной промышленности является недостаточное финансирование производителей государством или недостаточный объем заказов от государства для предприятия. Наиболее актуальная и распространенная причина производителей не только электронной промышленности.

Низкая производительность труда в сравнении с зарубежными государствами и мировыми лидерами производства. В доказательство данной причины приводят оценки Росстата отставания производительности труда в Российской Федерации (РФ) от стран-участников Организации экономического сотрудничества и развития [2].

Еще одной из озвучиваемых причин низких темпов экономического и производственного роста отечественной электронной промышленности приводится использование отечественными производствами устаревшего, несовременного оборудования. К данной причине, как производную, можно отнести логистику и форму технологической линии производства отечественных предприятий.

Производство товара является лишь частью деятельности производства, одной из наиболее важных является реализации продукции. К наиболее актуальным и часто выделяемым проблемам относят сложную и запутанную форму менеджмента, занимающую большой объем рабочего времени и чаще всего не приводящую к итоговому результату приобретения товара.

Ко вторичным выявленным причинам низкой производительности и объемов продаж можно отнести миф о слишком высоких зарплатах в сфере электронной промышленности РФ и высокий уровень оплаты коммунальных услуг отопления производственных помещений в сравнении с мировым лидеров – Китаем. Как правило, именно такими правило, чаще всего оперируют сотрудники предприятий отечественной электронной промышленности, не уделяя должного внимания внешним факторам. Помимо объяснимых естественных факторов, стоит отметить сложно прогнозируемые. Примером являются пандемия COVID-19 и самоизоляция в 2020 г., повлиявшие на производительность труда и объемы производства электронной промышленности не только в РФ, но и во всем мире, вызвав дефицит электронных компонентов. Что, с одной стороны, сформировало высокий спрос на продукции электроники, а с другой стороны – невозможность удовлетворения данного запроса ввиду объемов и специфики требований заказчика.

Анализ рассмотренных проблем

Проводя анализ проблемы отставания отечественных производителей от зарубежных компаний и лидеров рынка электронной промышленности, стоит отметить, что предприятия электронной промышленности РФ действительно отстают от ведущих зарубежных компаний. Данный вывод можно сделать по результатам первой системной попытки «поднять» отрасль электронной промышленности, принятой правительством РФ в 2007 г. «Стратегия развития электронной промышленности России на период до 2025 года». Данный проект подразумевал несколько подпрограмм, описывающих стратегии увеличение объема отрасли электронной промышленности. По результатам работы программ не было достигнуто запланированного объема продаж в 300 млрд рублей в 2015 и 2020 гг. Причиной таких результатов является ориентация многих проектов на закупки со стороны государства для госструктур, например, процессоры «Эльбрус» и «Байкал», ориентированные на автоматизацию рабочих мест, организацию систем хранения данных и т. д. или микроконтроллер «Миландр», ориентированный на электрические счетчики [3].

В России достаточно сложно строить планирование на продолжительный срок окупаемости, что подтверждает ориентацию отечественной электронной промышленности на госзаказы, учитывая их степень финансовой надежности при планировании деятельности производства на срок более пяти лет. Действительно, как описывалось выше, для формирования собственного производства необходим большой объем вкладываемых средств, который возможно реализовать путем доступного кредитования предприятий под 1–3 % сроком на 5–20 лет. Данный факт предоставит защиту и уверенность в устойчивости производства, а также позволит снизить необходимый объем инвестиционного финансирования, что в совокупности с меньшими рисками сможет повысить объем вливания внешних финансов.

Касательно вопроса о выделении государством финансирования для предприятий, стоит отметить, что, учитывая специфику деятельности электронной промышленности, для отдельных проектов возможно получить финансирование через научно-исследовательские или опытно-конструкторские работы (НИР, НИОКР), как самостоятельно, так и совместно с государственными институтами. В данном случае существует возможность использования различного рода фондов содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. Например, Фонд содействия инновациям, или «Фонд Бортника», являющийся государственной некоммерческой организацией в форме федерального государственного бюджетного учреждения [4]. Такого рода существуют множество государственных организаций и программ, развития промышленности, предлагающих льготные условия финансирования проектов, направленных на разработку новой высокотехнологичной продукции, импортозамещение, лизинг производственного оборудования, станкостроение, цифровизацию действующих производств. Для реализации новых промышленных проектов предоставляются целевые займы от Фонда развития промышленности по ставкам 1 и 3 % годовых сроком до десяти лет в объеме от 5 млн до 5 млрд рублей, стимулируя приток прямых инвестиций в реальный сектор экономики [5]. Подобное решение позволит не только привлечь финансовые средства, осуществить развитие выпускаемой продукции, привлечь новый производственный персонал, но и достичь государственного технологического суверенитета. Производство конкурентноспособной отечественной продукции обеспечит организацию дополнительных государственных заказов.

Затрагивая вопрос государственных заказов, стоит рассмотреть компанию акционерную компанию «Микрон», являющуюся уникальным примером. Данная организация, помимо внутреннего рынка и государственных заказов, вышла на мировой рынок и уже на протяжении многих лет является поставщиком электронной продукции в страны зарубежья. Подобная практика требует технологической способности продукта конкурировать с мировыми аналогами, но добившись оптимального соотношения цена/качества, существует возможность нахождения определенной торговой ниши. При этом производитель будет вынужден в гибком формате менять свои подходы к продвижению собственной продукции.

Достаточно спорным фактом является производительность труда. Абсолютом для сравнения показателей в основном принимается индекс продуктивности США, показатель которого выше, чем в РФ. Стоит отметить, что данный параметр, как и во Франции, является искусственно завышенным за счет высокой безработицы. При этом неизвестно каким образом происходит оценка производительности труда в других странах-производителях. Также стоит отметить отставание планового ежегодного роста в 5 % производительности труда в РФ на уровне 2 % [6]. Данные факты свидетельствуют о том, что низкий уровень производительности труда из-за непрозрачности оценивания является сложным параметром при сравнении с мировыми лидерами производителями электронной промышленности, но тем не менее данный параметр необходимо учитывать ввиду его прямого влияния.

Рассматривая описанную проблему использования устаревшего оборудования, стоит отметить, что, несмотря на то, что в современном мире технологическое развитие обозначено как период Четвертой промышленной революции, многие отечественные производства до настоящих дней действительно работают на оборудовании производства СССР без глобальной трансформации и замены оборудования. Причины данных решений являются зачастую внутренними для руководств таких производств. В данном случае государство РФ также активно способствует поощрению технологической трансформации, что подтверждается существованием государственного учреждения – Фонда развития промышленности.

Возвращаясь к теории логистики, менеджмента и линии производства, стоит выделить, что правильно сформированная технологическая линия производства и логистика позволяют избежать излишних финансовых и временных затрат. Во многих отечественных предприятиях, по причине изначального проектирования объекта под производства других продуктов или смены производимых товаров технологическая линия не всегда отвечает оптимальным нормам. Менеджмент реализации продукции также относится к важнейшим этапам. Практика показывает запутанную систему менеджмента отечественных производств, не проявляющую гибкость. Чаще всего для заказа продукции необходимо заполнить несколько форм анкет различных форматов, на разных этапах формирования запроса. При этом итоговую стоимость изделия возможно узнать в самом конце, чаще всего после тестирования опытного образца продукции. Данный факт может становиться причиной отказа потребителя от услуг или

товара производителя, при этом затратив значительное количество рабочего времени обеих сторон, что также относится к финансовым потерям.

Как было описано выше, чаще всего в качестве причин низких финансовых показателей, не только в электронной промышленности, приводят аргументы высоких заработных плат рабочих и высокой стоимости отопления производственных помещений. Приводится пояснение, что данные факты непосредственно влияют на итоговую стоимость продукции. Для начала стоит отметить, что заработные платы в РФ являются достаточно низкими в сравнении с оплатой труда в США, странах Европы или Китае. Согласно рейтингу зарплат мира, РФ находится на 62-м месте нижеописанных стран [7]. Кроме того, данный факт подтверждается социальным опросом коллег промышленных производств, связанных с электроникой и приборостроением из Китая. К тому же данный факт действительно является вторичным, поскольку заработная плата также зависит от многих внешних факторов, уровня жизни, объема оборота производства и т. д.

Высокая стоимость отопления помещений также является достаточно спорной причиной. Действительно, в РФ отопительный сезон длится семь месяцев, но при этом стоимость энергоресурсов в нашей стране – одна из самых дешевых в мире. В противовес отоплению в РФ можно привести необходимость на протяжении семи месяцев производить кондиционирование помещений в Китае, что влечет за собой затраты электроэнергии. Для проверки приводимой причины проведем расчет, при цене природного газа 6 рублей за 1 м^3 и времени работы системы на протяжении 2300 ч, учитывая снижение отопления в ночное время, затраты составляют 148 835 рублей в год на площадь 1000 м^2 промышленного помещения, высота потолков около 3 м без учета обслуживания и амортизации оборудовании. В подтверждение проведенным расчетам приведем данные предприятия ООО «МГБот» на арендуемых производственных площадях. Потребление газа за февраль 2022 г. составило 21 311 рублей в расчете на отопление 1000 м^2, таким образом, за семь месяцев можем предположить, что затраты составят 149 180 рублей. Как показывает практика, данные теоретических расчетов совпадают с практическими. Теперь для сравнения осуществим подсчет затрат на кондиционирование производственного помещения площадью 1000 м^2 в Китае. Для данной задачи необходим кондиционер мощностью 110 кВт. Для расчета реальной потребляемой мощности, необходимо номинальную мощность разделить на коэффициент охвата (ERR), который зависит от класса энергоэффективности кондиционера. Для нашего расчета примем класс «В», для него коэффициент ERR=3,5. Тогда получим реальную потребляемую мощность 110/3,5 = 31,5 кВт. При работе 2300 часов в год при охлаждении до 20 °С стоимость кондиционирования составляет 476 720 рублей. Стоимость электроэнергии принята 6,58 рубля, для города Хайхэ [7].

Заключение

По результатам проведенного исследования описанных причин низкого развития производства электронной промышленности, можно сделать следующие выводы. Такие наиболее часто озвучиваемые факторы, как высокие зарплаты и стоимость отопления производственных помещений, можно считать неактуальными, поскольку в сравнении с Китаем, как оплата труда, так и кондиционирование производственных помещений в России выходят значительно меньше.

Касательно вопроса финансирования и госзаказа, стоит отметить, что для промышленных предприятий существует большое количество различного рода фондов, помогающих и стимулирующих промышленность. При этом существует возможность разработки научно-исследовательских и опытно-конструкторских проектов, помогающих не столько привлекать инвестиции в производство, сколько осуществлять разработки нового оборудования за бюджетные средства, при этом поднимая уровень технологического суверенитета не только предприятия, но и государства в целом. Данный факт может стать причиной получения отдельный государственных заказов, отличающихся своей специализированностью. Внешние непредсказуемые факторы стоит отнести к особому типу по причине их непредвзятости, в качестве примера были приведены пандемия COVID-19 и самоизоляция.

Истинные причины находятся на данный момент не во внешней среде, а внутри самого предприятия, в его менеджменте, подходах к ведению дел, техническому оснащению и организации труда. К схожим выводам относительно менеджмента приходят и ученые А. М. Склюев и В. И. Хабаров, что описано в статье «Роль организационно-управленческих инноваций в развитии электронной промышленности России» [8]. Именно преобладание экс-

тенсивных процессов над интенсивными являются одними из главных тормозящих причин. При расширении производства, предприятия стараются нанять больше людей без изменения технологического процесса, вместо того, чтобы менять оборудования, внедрять роботов и совершенствовать организацию труда. Логистика, производственный процесс, менеджмент, рассмотрение не только внутреннего, но и внешнего рынка – именно эти факторы могут сыграть одну из важнейших ролей в развитии электронной промышленности. Учитывая современные успехи в технологической и практической областях электронной промышленности отечественными специалистами, можно с уверенностью утверждать о составлении возможной конкуренции мировым лидером отрасли.

Список источников

1. Национальный проект России «Цифровая экономика». URL: https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/(дата обращения: 15.03.2023).

2. Показатели производительности труда в РФ. URL: https://www.rbc.ru/economics/05/02/2019/5c5872889a794725eb8d815e (дата обращения: 22.03.2023).

3. Мировой рынок микросхем в РФ. URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/626bd1459a7947f2a2d25227(дата обращения 23.03.2023).

4. Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям). URL: https://fasie.ru/fund/(дата обращения: 30.04.2023).

5. Фонд развития промышленности. URL: https://frprf.ru/o-fonde/ (дата обращения: 02.05.2023).

6. Производительность труда в России Росстат. URL: https://rusind.ru/proizvoditelnost-truda-v-rossii.html (дата обращения: 09.05.2023).

7. «Тариф «Китайский»: по какой цене продают электроэнергию в КНР и сколько платят за свет жители Хэйхэ. URL: https://aftershock.news/?q=node/811660&full (дата обращения: 20.05.2023).

8. *Склюев А. М., Хабаров В. И.* Роль организационно-управленческих инноваций в развитии электронной промышленности России // Современная конкуренция. 2023. Т. 17, № 5. С. 101– 110. Doi: 10.37791/2687-0657-2023-17-5-101-110.

УДК 621.315.175 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-241-248**

О. Я. Солёная*
кандидат технических наук, доцент
А. Д. Мохомет*
студент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАССЫ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕКОНСТРУКЦИИ

Для осуществления эффективного отпуска электроэнергии и предотвращения гололедообразования на этапе проектирования электрической сети необходимо выбирать оптимальную конструкцию высоковольтной линии электропередачи. В работе проведено моделирование режимных параметров участка электрической сети напряжением 110 кВ путем изменения конструкции воздушной линии электропередачи (ВЛЭП) с помощью отечественного программного обеспечения «ЛЭП ПРО». Построены и проанализированы графики зависимости изменения напряжения в проводе и стрелы провеса от длины пролета ВЛЭП.
Ключевые слова: *воздушная линия электропередачи, моделирование, напряжение в проводе, режимные параметры, стрела провеса.*

O. Ya. Solenaya*
PhD, Tech., Associate Professor
A. D. Mokhomet*
Student
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

STUDY OF THE FEATURES OF MODELING THE OVERHEAD POWER LINE ROUTE DURING RECONSTRUCTION

To efficiently release electricity and prevent ice formation, it is necessary to choose the optimal design of a high-voltage power transmission line. The paper simulates the operating parameters of a section of the electrical network made at a voltage of 110 kV by changing the design of an overhead power transmission line using the power transmission LINE PRO software. Graphs of the dependence of the voltage change in the wire on the span length and the sag boom on the span length are constructed and analyzed.
Keywords: *overhead power line, simulation, voltage in the wire, operating parameters, sag boom.*

Введение

Электроэнергетическая система (ЭЭС) – совокупность установок и устройств, которые связаны общностью режима для непрерывного процесса производства, передачи, распределения и потребления электрической и тепловой энергии [1]. Моделирование режимов работы электроэнергетических систем позволяет с помощью экспериментов на моделях заменить сложные, а иногда и невозможные эксперименты на реальных объектах. Благодаря моделированию можно исследовать поведение ЭЭС в аварийных ситуациях, ее реакцию на технологические воздействия, связанные с изменением нагрузок в узлах, конфигурации сети, отключением или подключением отдельных элементов и т. д. Основным назначением проведения моделирования является прогнозирование поведения технической системы при различных условиях эксплуатации и изучение физических свойств существующего объекта с помощью исследования его режимных параметров.

Целью данного исследования является моделирование режимных параметров участка электрической сети, выполненной на напряжении 110 кВ, путем изменения конструкции воздушной линии электропередачи (ВЛЭП) и проведение на основе этого анализа изменения режимных параметров ЭЭС.

Под режимными параметрами электрической сети подразумеваются напряжения в узлах, токи на участках, углы расхождения век-

Таблица 1

Виды опор

Деревянные опоры	Железобетонные опоры	Металлические опоры
Преимущества		
1. Невысокая стоимость. 2. Высокая механическая прочность. 3. Простота конструкции и наименьшее сопротивление ветровым нагрузкам. 4. Так как древесина имеет высокие электроизоляционные свойства, то на опорах применяется меньшее количество подвесных изоляторов. 5. В некоторых случаях можно не использовать грозозащитные тросы и не делать заземление опор	1. Высокая механическая прочность. 2. Долговечны. 3. Не требуют больших расходов при эксплуатации	1. Рассчитаны на большие нагрузки. 2. Используются в любых климатических условиях. 3. Высокая механическая прочность. 4. Небольшая масса
Недостатки		
1. Менее долговечны по сравнению с металлическими и железобетонными опорами	1. Большая масса. 2. Удорожание транспортных расходов. 3. При сборке и монтаже требуют использование кранов большой грузоподъемности	1. Высокая стоимость. 2. Подвержены коррозии. 3. Дефицитность металла

торов электродвижущей силы ЭДС и напряжений, а также активные, реактивные и полные мощности.

Основные положения

Для достижения поставленной цели применим специализированное программное обеспечение отечественного производства «ЛЭП ПРО», благодаря которому возможно проводить удобное построение магистральной линии, редактирование трассы, расчет основных режимных параметров сети, автоматический подбор и замену арматуры на аналоги, формировать спецификацию электрооборудования [2].

Основные компоненты проекта прокладки линий электропередач (рис. 1):

1) трасса – расположение оси ВЛЭП на земле;

2) пикеты (ПК) – обозначения промежуточных участков трассы определенной длины, которая зависит от номинального напряжения ВЛЭП и типа местности. Нулевой пикет обозначает начало трассы. Производственный пикетаж – это установка центровых и пикетных указателей на трассе в соответствии с ведомостью расстановки опор;

3) опора – конструкция, предназначенная удерживать провода, оптоволоконные линии связи над поверхностью земли и на заданном расстоянии друг от друга. Существует несколько видов опор, преимущества и недостатки которых рассмотрены в табл. 1.

1. Фундамент опоры – прочная конструкция, закрепленная в почве или опирающаяся на нее, которая предназначена для удержания стоек воздушных линий электропередач (рис. 2). Основание фундамента – грунт нижней части котлована, который принимает на себя всю нагрузку. Самым универсальным фундаментом является железобетонный, поскольку подходит для опор, которые проходят над землей с различным грунтом, обладает оптимальными технико-экономическими характеристиками и удовлетворительной надежностью конструкции. Одной из составляющих частей фундамента является ростверк опоры. Его функция заключается в распределении нагрузки от опоры ВЛЭП по поверхности фундамента.

2. Пролет (длина пролета) – расстояние между центрами двух опор, на которых подвешены провода. Пролеты бывают нескольких видов:

1) промежуточный пролет (между двумя соседними промежуточными опорами);

2) анкерный пролет (между анкерными опорами);

3) переходный пролет – расстояние, пересекающее какую-либо постройку или естественную преграду (реку, овраг);

На трассе строящейся ВЛЭП центром расположения опоры является центровой знак.

3. Стрела провеса – расстояние по вертикали между низшей точкой провода в пролете и прямой, которая соединяет точки его крепления на опорах. Рассчитывается по формуле:

$$f = \frac{l^2\gamma}{8\sigma},$$

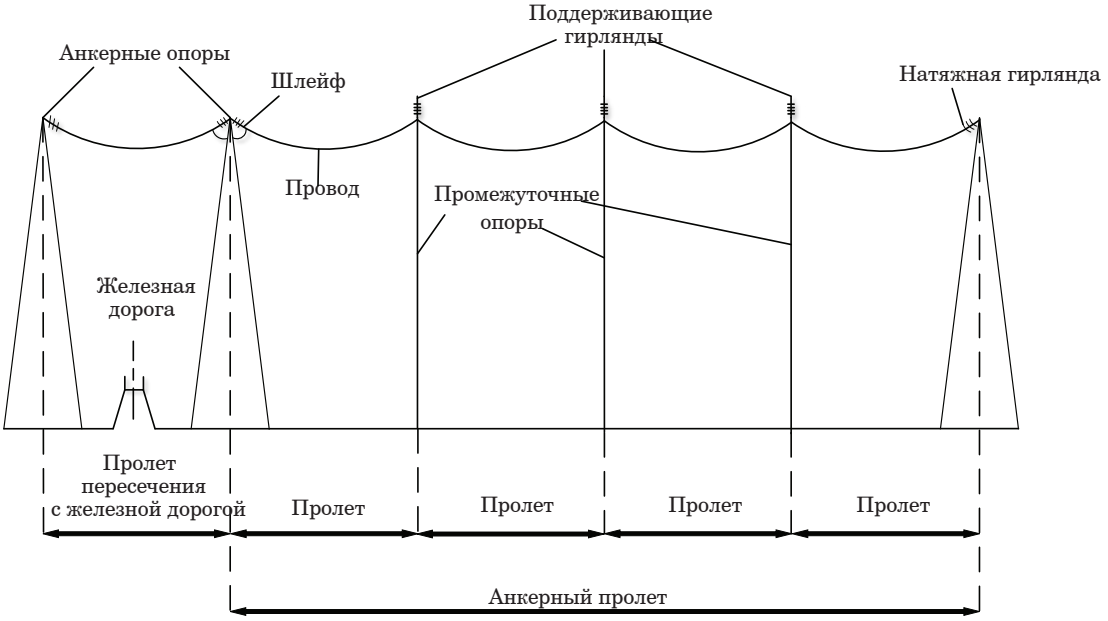


Рис. 1. Составные части ВЛЭП

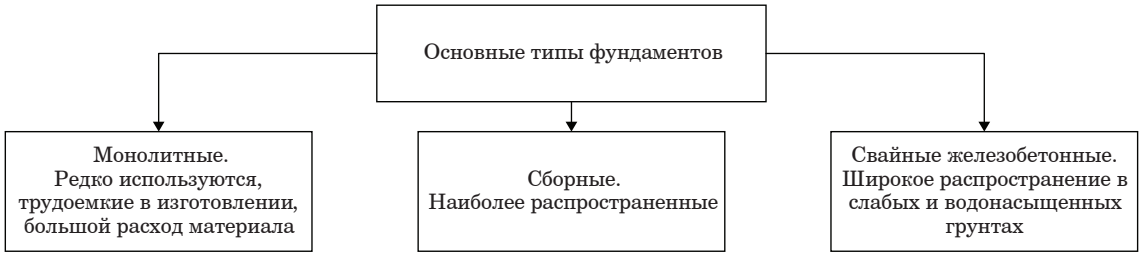


Рис. 2. Основные типы фундаментов

где l – длина провода, м; γ – приведенная нагрузка в проводе, МПа/м; σ – напряжение в проводе, МПа.

4. Габарит провода – вертикальное расстояние от провода в пролете до пересекаемых трассой инженерных сооружений, поверхности земли или воды.

5. Шлейф – часть провода, которая соединяет на анкерной опоре натянутые провода ближайших анкерных пролетов.

6. Угол поворота линии – угол α между направлениями трассы ВЛЭП в соседних пролетах (до и после поворота) [3].

Моделирование

Объектом исследования для моделирования является магистральная ВЛЭП 110 кВ, эксплуатируемая в Республике Саха, Якутск, выполненная сталеалюминиевым проводом марки АС 120/19 на анкерных и промежуточных опорах, стоящих вдоль трассы длиной 1 км. Технические параметры ВЛЭП приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные параметры

Марка провода	Тип опоры
АС 120/19	1 АУС 110П-1Т
	2 АУС 110П-1Т
	3 АУС 110П-1у
	4 ПС 110П-2
	5 ПС 110П-2
Мощность	1000 кВт
Климатические условия	
Максимальная температура, °С	35
Минимальная температура, °С	–61
Среднегодовая температура, °С	–8
Температура при гололеде, °С	–10
Температура при ветре, °С	–5
Температура при грозе, °С	15
Регион	Якутск
Район по ветру	II
Район по гололеду	I
Скорость ветра, м/с	29
Ветровое давление, Па	500
Стена льда, мм	10

Реконструкция объекта выполняется на основании СНиП 12-01-2004 [4]. В работе будет изменяться тип опор с помощью систематического расчета провода, целью которого является построение зависимостей напряжения в проводе от длины пролета и стрелы провеса ВЛЭП от длины пролета.

Выбор марки и сечения провода зависит не только от передаваемой мощности, но и от механических нагрузок. На ВЛЭП кроме постоянных нагрузок, которые действуют на фундаменты опор, провода, изоляторы и арматуру, присутствуют и переменные нагрузки, такие как:

1) изменение температуры окружающего воздуха;

2) появление гололеда, ветра;

3) вибрация и «пляска» проводов.

К примеру, при изменении температуры воздуха увеличивается или уменьшается длина провода, следовательно, изменяются стрелы провеса и тяжение провода. Так при положительных температурах длина провода увеличивается, тяжение провода снижается, напряжение материала уменьшается, а при отрицательных температурах длина провода уменьшается, тяжение увеличивается, напряжение материала возрастает [5].

Согласно правилам устройства электроустановок [6] район по ветру определяется по нормативному ветровому давлению W_0 на высоте 10 м над поверхностью земли, а район по гололеду определяется по нормативной толщине стенки гололеда $b_э$ для высоты 10 м над поверхностью земли [6]. Данные параметры приведены в табл. 3; 4.

Данные параметры были занесены в программно-вычислительный комплекс ЛЭП ПРО, далее был проведен расчет массогабаритных и эксплуатационных показателей ВЛЭП в нормальном режиме работы сети. Основные параметры представлены на рис. 3.

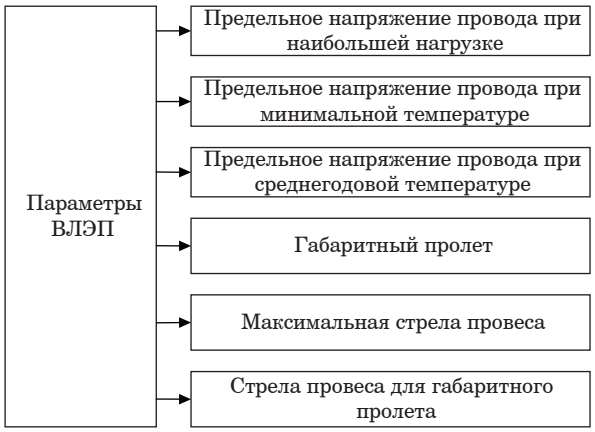


Рис. 3. Основные параметры ВЛЭП

Также ЛЭП ПРО позволяет определить так называемые вспомогательные показатели ВЛЭП, которые показаны на рис. 4.

Под критическим пролетом понимается пролет, в котором натяжение провода в режиме минимальных температур соответствует натяжению в режиме минимальных температур и натяжение в режиме дополнительных нагрузок соответствует максимально допустимому натяжению данного провода (рис. 5).

Критический пролет можно рассчитать по формуле:

$$l_{кр} = \sigma_{доп} \cdot \sqrt{\frac{24\left(T_{\gamma max} - T_{min}\right)}{\gamma_{max}^2 - \gamma_1^2}},$$

где $T_{\gamma\ max}$ – температура режима наибольшей внешней нагрузки; γ_1 – удельная нагрузка; $\sigma_{доп}$ – допустимое напряжение.

Таблица 3

Нормативное ветровое давление

Район по ветру	Нормативное ветровое давление W_0, Па
I	400
II	500
III	650
IV	800
V	1000
VI	1250
VII	1500
Особый	Выше 1500

Таблица 4

Нормативная толщина стенки гололеда

Район по гололеду	Нормативная толщина стенки гололеда, мм
I	10
II	15
III	20
IV	25
V	30
VI	35
VII	40
Особый	Выше 40

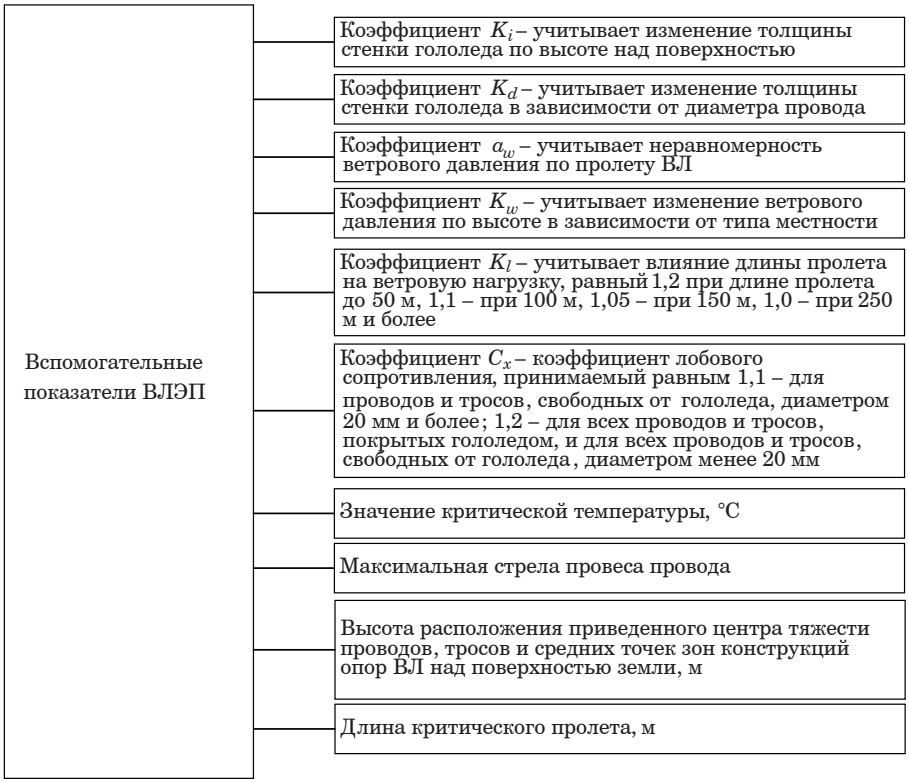


Рис. 4. Вспомогательные показатели ВЛЭП

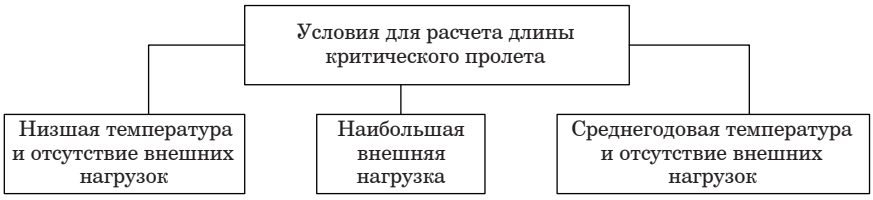


Рис. 5. Условия расчета длины критического пролета

С помощью коэффициентов a_w, K_l, K_w, C_x можно определить нормальную ветровую нагрузку на провода. Толщина стенки гололеда на проводах определяется с помощью коэффициентов K_i, K_d. Результаты расчета основных параметров участка сети с пятью пролетами приведены в табл. 5. Полученные параметры приведены на рис. 6.

Результаты расчета вспомогательных параметров участка сети с пятью пролетами приведены в табл. 6.

В табл. 7 представлены расчетные данные напряжения и стрелы провеса для построения зависимостей, которые изображены на рис. 7–9. В табл. 8 представлены сокращенные обозначения марок опор и их расшифровка. Для проведения сравнительного анализа режимных параметров сети в ПВК ЛЭП ПРО была произведена замена типов опор по всей трассе. Полученные характеристики отражены на графиках зависимостей напряжения провода от длины пролета, стрелы провеса от длины пролета (по ветру) и на графике зависимости стрелы провеса от длины пролета (по гололеду).

Расчет зависимости напряжения от длины пролета вычисляется по формуле:

$$\sigma_p = \frac{l^2 \gamma_p^2 E}{24\sigma_p^2},$$

где σ_p – рассчитываемое напряжение; γ_p – рассчитываемая удельная нагрузка; E – модуль упругости; l – рассчитываемая длина пролета.

Таблица 5

Результаты расчета основных параметров ВЛЭП

Основные параметры	Пролет 1–2	Пролет 2–3	Пролет 3–4	Пролет 4–5
Предельное напряжение провода при наибольшей нагрузке, Н/мм^2	120	120	120	120
Предельное напряжение провода при минимальной температуре, Н/мм^2	120	120	120	120
Предельное напряжение провода при среднегодовой температуре, Н/мм^2	90	90	90	90
Габаритный пролет, м	188	188	188	335
Максимальная стрела провеса, м	1,72	1,72	1,94	1,41
Стрела провеса для габаритного пролета, м	3,65	3,65	3,65	10,16

Таблица 6

Вспомогательные параметры

Вспомогательные параметры	Пролет 1–2	Пролет 2–3	Пролет 3–4	Пролет 4–5
Высота тяжести провода, м	10,82	10,82	10,75	18,90
Коэффициент K_i	1	1	1	1
Коэффициент K_d	1	1	1	1
Коэффициент a_w	0,71	0,71	0,71	0,71
Коэффициент K_w	1	1	1	1,20
Коэффициент K_1	1,10	1	1,09	1,12
Коэффициент C_x	1,20	1,20	1,20	1,20
Длина критического пролета № 1, м	512,82	512,82	512,82	512,82
Длина критического пролета № 2, м	238,49	238,49	239,56	215,18
Длина критического пролета № 3, м	148,60	148,60	149,38	132,02
Исходный режим для расчета	min t	min t	min t	min t
Критическая температура, °С	11,77	11,77	12,76	10,26
Режим максимальной стрелы провеса провода	T_{max}	T_{max}	T_{max}	T_{max}

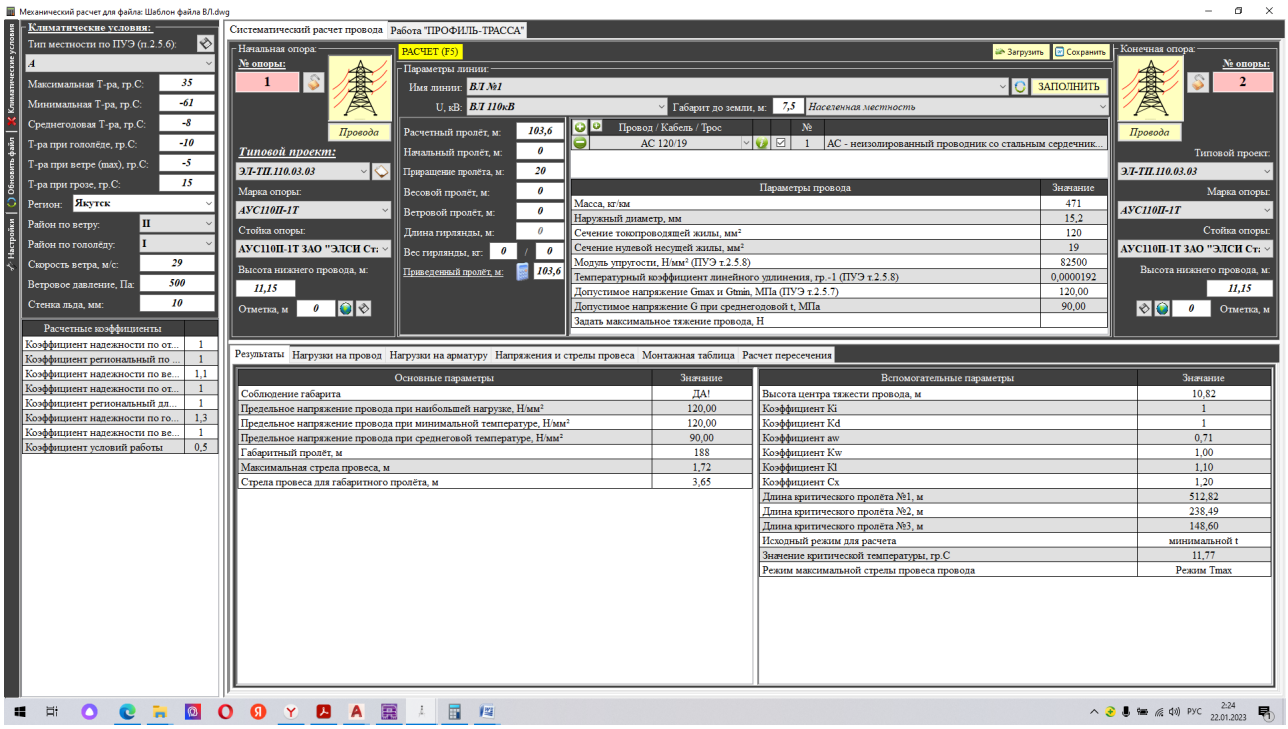


Рис. 6. Пример расчета основных и вспомогательных параметров

Таблица 7

Напряжения и стрелы провеса

Пролеты между опорами. Тип опор, длина пролета, м	1Т-1Т, 103,6	1Т-1у, 103,6	1у-2, 114,4	2-2, 87,9
U в проводе, Н/мм^2	78,549	78,549	82,285	75,933
Стрела провеса при ветре, м	1,13	1,13	1,31	0,84
Стрела провеса при гололеде, м	0,89	0,89	1,02	0,81
Пролеты между опорами. Тип опор	2Т-5Т	5Т-2	2-1Т	1Т-1Ту
U в проводе, Н/мм^2	81,654	78,549	85,514	73,016
Стрела провеса при ветре, м	1,08	1,13	1,26	0,87
Стрела провеса при гололеде, м	1,02	0,89	1,17	0,71

Таблица 8

Обозначение опор

Обозначение	Марка опоры	Тип	Статус
2	ПС 110П-2	Опора промежуточная с траверсой	До реконструкции
1Т	АУС 110П-1Т	Опора анкерная с тросом, двухстоечная + траверса	
1у	АУС 110П-1у	Опора угловая анкерная с тросом, двухстоечная + траверса	
5Т	ПС 110П-5Т	Опора промежуточная с траверсой	После реконструкции
2Т	ПС 110П-2Т	Опора промежуточная с траверсой	
1Ту	АУС 110П-1Ту	Опора угловая анкерная с тросом, двухстоечная + траверса	

Формула для расчета стрелы провеса от длины пролета описывалась выше:

$$f = \frac{l^2 \gamma}{8\sigma}.$$

Удельная нагрузка для определенных погодных условий, в рассматриваемом случае от гололеда и ветра, рассчитывается в зависимости от следующих факторов:

– веса гололеда на проводе:

$$\gamma = \frac{\pi g_0 c_{\max} K_w K_p K_f K_d \left(d + c_{\max}\right)}{F},$$

где F – фактическое сечение провода, мм^2; d – диаметр провода, мм; g_0 – удельный вес льда,

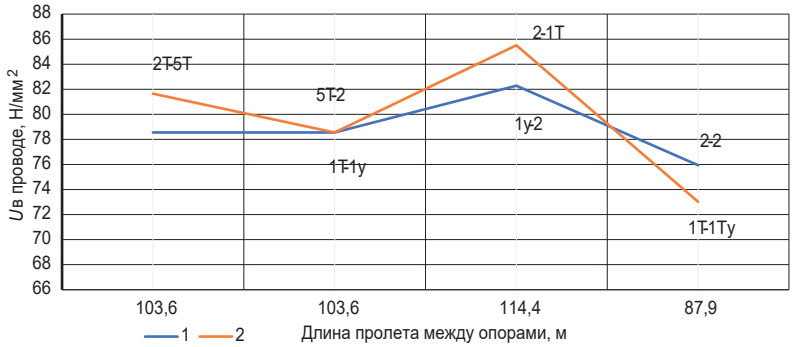


Рис. 7. Зависимость напряжения провода от длины пролета в режиме «Ветер и гололед»

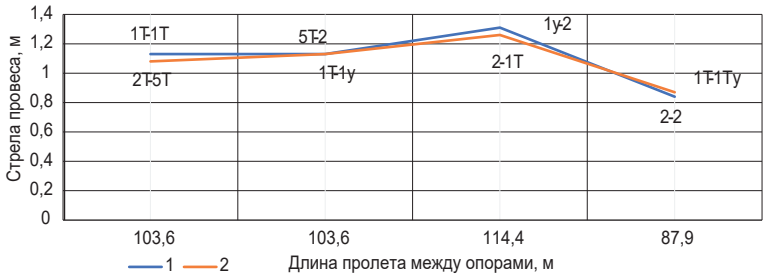


Рис. 8. Зависимость стрелы провеса от длины пролета (по ветру)

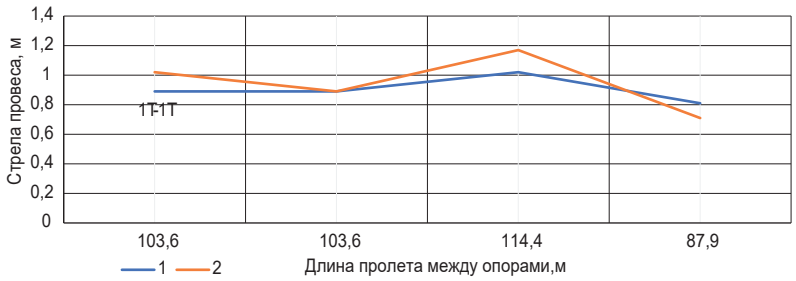


Рис. 9. Зависимость стрелы провеса от длины пролета (по гололеду)

Н/м·мм^2; K_w – коэффициент надежности; K_p – региональный коэффициент; K_f – коэффициент надежности по гололедной нагрузке; K_d – коэффициент условий работы;

– ветра и веса провода без гололеда:

$$\gamma = \sqrt{\gamma_{\text{вес}}^2 + \gamma_{\text{ветер}}^2},$$

$\gamma_{\text{вес}}$ – удельная нагрузка от собственного веса провода; $\gamma_{\text{ветер}}$ – удельная нагрузка от давления ветра, который действует перпендикулярно проводу при отсутствии гололеда.

Заключение

В результате моделирования реконструкции магистральной ВЛЭП 110 кВ из полученных графиков зависимостей можно сказать, что тип опоры имеет незначительное влияние на показатели напряжения в точке подключения сети и стрелы провеса в независимости от длины пролетов. Также становится очевидно то, что чем больше длина пролета между опорами, тем выше показатели напряжения в проводе и стрелы провеса.

При замене анкерных и промежуточных типов опор получившиеся значения напряжения в проводе не превышают предельного напряжения провода при среднегодовой температуре, аналогично значения стрелы провеса находятся в пределах максимальной длины провеса проводов. Следовательно, выбранные для замены типы опор можно использовать для реконструкции данного объекта. При проектировании воздушных линий электропередач также учитываются геодезические данные, от которых будет зависеть выбор типов опор, поскольку для каждого типа необходим свой фундамент, следовательно, от этого напрямую зависят экономические показатели.

Также стоит отметить, что современное отечественное программное обеспечение ЛЭП ПРО удобно в построении и оформлении трасс ВЛЭП, оно позволяет проводить моделирование сети на этапе проектирования и эксплуатации, что, безусловно, повышает эффективность функционирования и дает существенную базу для ее развития.

Список источников

1. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП) / утв. Приказом Минэнерго России от 13.01.2003. № 6. URL: https://tk-servis.ru/uploads/files/ntd/ntd-222-20181206-211321.pdf?ysclid=leojieyal834923691 (дата обращения: 20.08.2023).

2. Программа ЛЭП ПРО: официальный сайт. URL: https://armatech.group/lep-pro/ (дата обращения: 20.08.2023).

3. Линия электропередачи. Энциклопедия Руниверсалис. URL: https://xn--h1ajim.xn--p1ai/index.php/%D0%9B%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%8F_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D1%87%D0%B8 (дата обращения: 20.08.2023).

4. СП 48.13330.2019. Свод правил. Организация строительства. СНиП 12.01-2004. URL: https://srosvo.ru/wp-content/uploads/2022/07/SP-48.13330.2019.-Svod-pravil.-Organizatsiya-stroitelstva.-SN.pdf?ysclid=leok25tqcm1703967 (дата обращения: 28.09.2023).

5. *Магидин Ф. А., Берковский А. Г.* Устройство и монтаж воздушных линий электропередачи. 1971. 255 с.

6. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. URL: http://pue7.ru/pue7/sod.php (дата обращения: 20.09.2023).

УДК 621.314.222.6 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-249-258**

А. А. Софронов*,**
студент, инженер 3-й категории
Е. А. Геклер*
главный конструктор
А. А. Мартынов**
кандидат технических наук, доцент
** АО «Научно-промышленный центр „Силовые электротехнические системы"»*
*** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С УЧЕТОМ ОСТАТОЧНОГО ПОТОКА НАМАГНИЧИВАНИЯ

Выполнено сравнение основных вариантов построения моделей трансформаторов, и предложена уточненная модель, выполненная на основе совокупности электрической и магнитной систем. На модели рассмотрены электромагнитные переходные процессы при пуске трансформатора как с учетом, так и без учета остаточного потока намагничивания. Напряжение на преобразовательный трансформатор подается от вспомогательного трансформатора. Повышение точности моделирования переходных процессов пуска трансформатора достигнуто за счет более полного учета состояния магнитной системы трансформатора, а также учета электрических нагрузок трансформатора перед его выключением.
Ключевые слова: *бросок пускового тока, магнитный гистерезис, трехфазный трансформатор, модель Джайлса – Атертона.*

A. A. Sofronov*,**
Student, Engineer 3rd category
E. A. Geckler*
Chief Designer
A. A. Martynov**
PhD, Tech., Associate Professor
**JSC ''Scientific and Industrial Center Power Electrical Systems''*
*** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

IMPROVING THE ACCURACY OF MODELING ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS OF A CONVERTER TRANSFORMER, TAKING INTO ACCOUNT THE RESIDUAL MAGNETIZATION FLUX

The paper compares the main options for constructing transformer models and proposes a refined model based on a combination of electrical and magnetic systems. The model considers electromagnetic transients during transformer start-up, both taking into account and without taking into account the residual magnetization flux. The voltage to the converter transformer is supplied from an auxiliary transformer. An increase in the accuracy of modeling transient transformer start-up processes has been achieved by more fully taking into account the state of the transformer's magnetic system, as well as taking into account the electrical loads of the transformer before switching it off.
Keywords: *inrush current, magnetic hysteresis, three-phase transformer, Gills – Atherton model.*

Введение

Силовые и преобразовательные трансформаторы – это одна из неотъемлемых частей судовых электроэнергетических систем (СЭЭС). При проектировании к ним предъявляются особые требования по надежности и массогабаритным показателям. Подключение мощных трансформаторов в СЭЭС сопровождается бросками тока намагничивания, которые могут привести к ложному срабатыванию защит или в худшем случае, к выходу из строя оборудования. Нели-

нейные свойства ферримагнитного сердечника и остаточная намагниченность сильно усложняют задачу моделирования трансформаторов в переходных режимах. Наиболее сложной задачей являться моделирование работы трансформатора в режиме пуска.

Наиболее распространенные схемы моделирования переходных процессов трансформатора строятся с использованием Т- и Г-образных схем замещения трансформатора в виде продольной и поперечной ветви намагничивания, при этом параметры нагрузки и вторичной обмотки приводятся к первичной. Представление трехфазных трансформаторов в виде группы однофазных трансформаторов не позволяют адекватно симулировать пуск. В [1] показано, что при использовании таких моделей исследование переходных процессов трансформатора носит приближенный характер. В работах [2–5] рассмотрено построение моделей трансформаторов с учетом влияния взаимных индуктивностей обмоток и потоков, идущих вне магнитного сердечника. Это позволяет значительно повысить точность расчетов и учесть конструктивные особенности трансформаторов, однако большую сложность представляет определение магнитного сопротивления путей магнитного потока вне сердечника. Получение параметров схемы требует построения отдельных моделей электромагнитного поля трансформатора.

Находят применение и матричные модели трансформаторов [6, 7]. В этом случае трансформатор описывается в виде матрицы активного сопротивления и матрицы собственной и взаимной индуктивности обмоток. Данные модели характеризуются высокой точностью и низкими требованиями к вычислительной мощности, что позволяет проводить на них симуляцию в режиме реального времени. Серьезный недостаток матричных моделей заключается в увеличении порядка матриц при учете большего количества вторичных обмоток.

Большинство прикладных программ для расчета и симуляции работы полупроводниковых преобразователей электроприводов имеют встроенные модели трансформаторов. При этом в них жестко определен набор групп соединения обмоток и возможное количество обмоток. Так, в MatLab Simulink представлены варианты трансформаторов, позволяющие учесть насыщение магнитопровода трансформатора, потери в стали, однако число вторичных обмоток у данных моделей ограничено двумя и доступны только основные группы соединения (звезда, треугольник, зигзаг). Большинство таких моделей построены по групповой схеме и дают лишь примерную картину переходного процесса [1]. Зарубежные производители предоставляют кривые намагничивания трансформатора в виде зависимости потокосцепления от тока намагничивания $\Psi=f(I\mu)$, в то время как для отечественных трансформаторов приводится материал сердечника и кривая его намагничивания $B=f(H)$ как зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля. Без конструктивных параметров трансформатора и знания рабочей точки трансформатора, преобразование кривой намагничивания оказывается неточным.

Моделирование работы трансформаторов возможно и на базе программ для расчета электромагнитных полей. Программы ELCUT, ANSYS Maxwell и COMSOL Multiphysics дают высокую точность расчетов, но требуют 2D- или 3D-модель трансформатора и значительного времени моделирования. Применение этих программ оправдано при проектировании новых трансформаторов [8].

В [9] приведены результаты моделирования переходных процессов трансформатора в программной среде MatLab Simulink. В этой работе характеристика намагничивания трансформатора задается кусочно-линейной зависимостью между потокосцеплением и током намагничивания в относительных единицах, $\Psi=f(I\mu)$. Модель позволяет выполнить исследования переходных процессов прямого пуска трансформатора без учета и с учетом остаточного потока намагничивания, а также плавного пуска трансформатора с использованием устройства плавного пуска, выполненного на основе тиристорного регулятора напряжения.

В работе показано, что максимальная амплитуда импульса тока при включении трансформатора зависит от фазы включения, величины остаточного потока намагничивания, значения потокосцепления в точке излома характеристики намагничивания и наклона характеристики намагничивания в области насыщения. Следует отметить, что ошибка в задании наклона характеристики намагничивания в области насыщения при моделировании процесса пуска трансформатора приводит к появлению существенной погрешности в расчете амплитуды броска тока. Величина остаточного потока задается в определенной мере приблизительно, без учета значений токов, протекавших по обмоткам трансформатора перед его выключением. Это также приводит к появлению погрешности в расчете амплитуды броска тока.

Совершенно очевидно, что повышение точности моделирования переходных процессов

трансформатора возможно только путем совершенствования модели с целью придания ей новых возможностей и расширения области исследования как электрических параметров, так и магнитных параметров трансформатора. В первую очередь, это относится к точности задания остаточного потока намагничивания. Для повышения точности моделирования необходимо также, чтобы модель позволяла бы определить величину остаточного потока намагничивания с учетом электрических нагрузок трансформатора до его выключения.

Описание модели трансформатора

Разработка модели трансформатора выполнена с учетом отмеченных выше требований по ее совершенствованию. Модель построена в программе MatLab Simulink на основе пакета Simscape Electrical и модели Джайлса – Атертона для изотропных материалов. Коэффициенты модели определяют семейство кривых намагничивания материала и переходов по ним. Введение модели магнитного гистерезиса Джайлса – Атертона позволило учитывать состояния магнитного сердечника и процессы, протекающие в нем, в каждый момент времени, включая и момент времени, предшествующий выключению трансформатора, и тем самым была повышена точность моделирования переходных процессов пуска.

На рис. 1 приведены конструктивная схема магнитной системы трансформатора (рис. 1 , *а*)

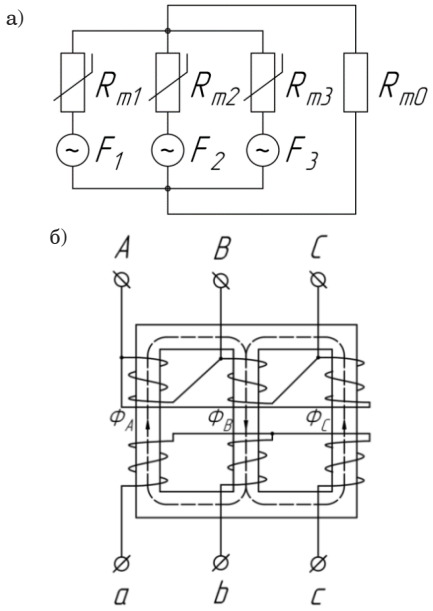


Рис. 1. Магнитный сердечник трансформатора (а); схема замещения магнитной системы трансформатора (б)

и ее схема замещения (рис. 1, *б*). Схема состоит из нелинейного магнитного сопротивления стержня и объединенного с ним участка ярма, источника магнитодвижущей силы (МДС) и магнитного сопротивления нулевой последовательности [10]. Поток нулевой последовательности проходит частично вне магнитопровода трансформатора, при номинальном режиме работы сопротивление нулевой последовательно-

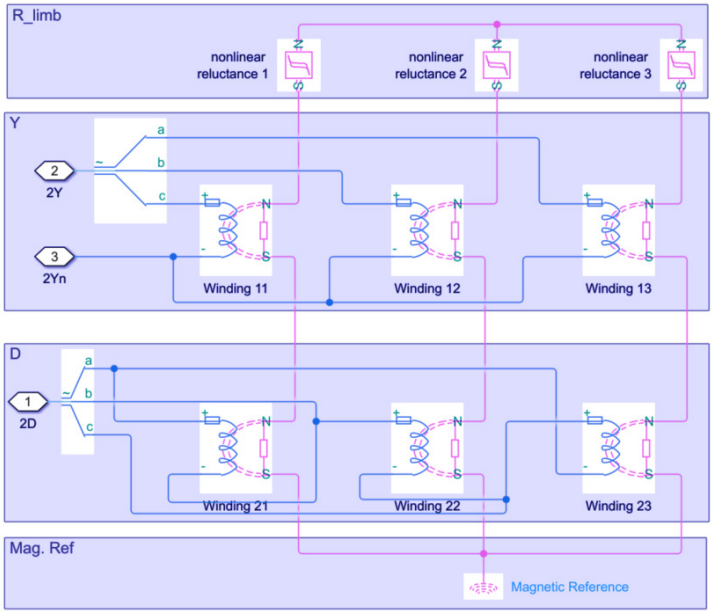


Рис. 2. Модель трансформатора на основе взаимосвязанных магнитной и электрической систем

сти во много раз больше чем магнитное сопротивление сердечника. Только в случае глубокого насыщения сердечника их сопротивления станут близкими по величине, а поток начнет протекать частично вне магнитопроводе. Без учета магнитного сопротивления нулевой последовательности значения пусковых токов могут оказаться завышенными [6].

Разработанная модель трансформатора на основе связи магнитной и электрической цепи представлена на рис. 2, где синим цветом обозначены электрические цепи, розовым – магнитные. Обмотки осуществляют связь между электрической и магнитной системой. Блок нелинейного магнитного сопротивления задает геометрические параметры сердечника и его материала. Использование данной модели упрощает моделирование преобразовательных трансформаторов, так как она симметрична и не зависит от выбора первичной обмотки (Возможно подключение к сети через любую обмотку без необходимости пересчета параметров). Допустимы все группы соединения обмоток, так как части одной обмотки могут быть помещены на разные стержни, а затем соединены требуемы образом в электрической части.

Конструктивно магнитопровод трансформатора выполнен по трехфазной стержневой схеме. Величина МДС, создаваемой обмоткой трансформатора, определяется по формуле (1):

$$F = Wi, \tag{1}$$

где F – МДС обмотки; W – количество витков обмотки; i – ток обмотки.

МДС создает магнитный поток Ф. Изменение потока в стержне сердечника трансформатора приводит к появлению на выводах обмоток разности потенциалов:

$$U = -W\frac{d\Phi}{dt} + \frac{W^2}{R_{\text{м.р}}}\frac{di}{dt} + Ri, \tag{2}$$

где U – напряжение на выводах обмотки; Φ – поток, проходящий через обмотку; $R_{\text{м.р}}$ – магнитное сопротивление рассеяния обмотки; R – активное сопротивление обмотки.

Значение магнитного сопротивления рассеяния определяется по формуле (3) при известных параметрах Т-образной схемы замещения:

$$R_{\text{м.р}} = \frac{W}{L}, \tag{3}$$

где L – индуктивность рассеяния обмотки.

Переменный магнитный поток приводит к появлению вихревых токов в листах сердечника магнитопровода трансформатора. Их можно учесть введением блока «Eddy Losses» в модель каждого стержня трансформатора. Блок моделирует эффект токов Фуко путем генерации МДС, которая выступает против изменений в магнитном потоке. Значение вычисляется по формуле (4):

$$F_{\text{ф}} = G_{\text{Э}}\frac{d\Phi_L}{dt} + R_{\text{м.п}}\Phi_L, \tag{4}$$

где $F_{\text{ф}}$ – *МДС,* генерируемая токами Фуко; $G_{\text{Э}}$ – проводимость петли тока Фуко; Φ_L – основной поток; $R_{\text{м.п}}$ – паразитное последовательное магнитное сопротивление.

Результирующий поток Ö через блок потерь в магнитопроводе:

$$\Phi = F_{\text{ф}}\Phi_{\text{м}} + \Phi_L, \tag{5}$$

где $G_{\text{м}}$ – паразитная параллельная магнитная проводимость.

При известном активном сопротивлении ветви намагничивания можно оценить значение проводимость петли вихревых токов:

$$G_{\text{Э}} = \frac{k_{\text{тр}}^2}{R_m}, \tag{6}$$

где $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трансформации; R_m – активное сопротивление ветви намагничивания.

Магнитное сопротивление сердечника трансформатора в схеме замещения задается неявным образом при помощи модели Джайлса – Атертона. То есть сопротивление участка магнитопровода вычисляется на каждом шаге решения, оно зависит от значения магнитного потока и предыдущего состояния сердечника. Модель симулирует поведение материала в изменяющемся магнитном поле, при этом коэффициенты модели определяют форму петли гистерезиса. Как показано в [1] и [11], применение модели Джайлса – Атертона для симуляции работы трансформатора способствует повышению точности моделирования по сравнению с использованием основной кривой намагничивания.

Определение параметров материала для модели Джайлса – Атертона по паспортным кривым материала

Производители электротехнической стали в паспортных данных на материал приводят только основные параметры материалов, поэтому требуется проводить подбор параметров для модели Джайлса – Атертона. Схема на рис.

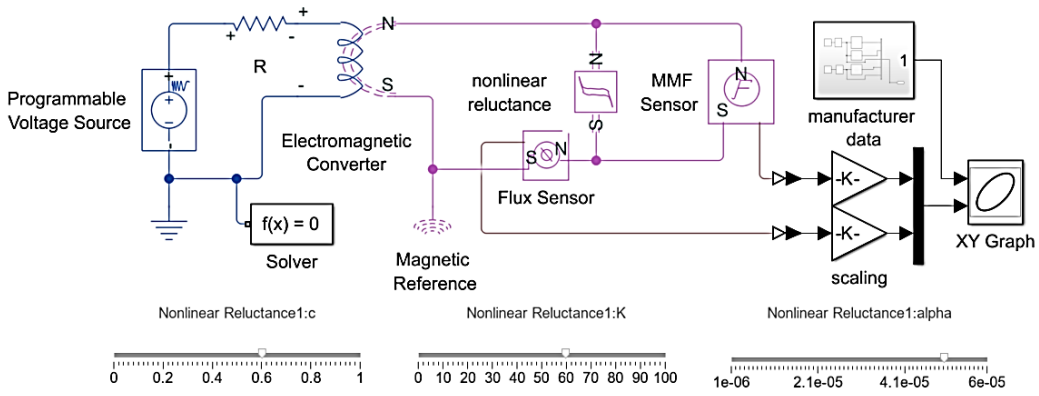


Рис. 3. Модель для подбора параметров гистерезиса материала

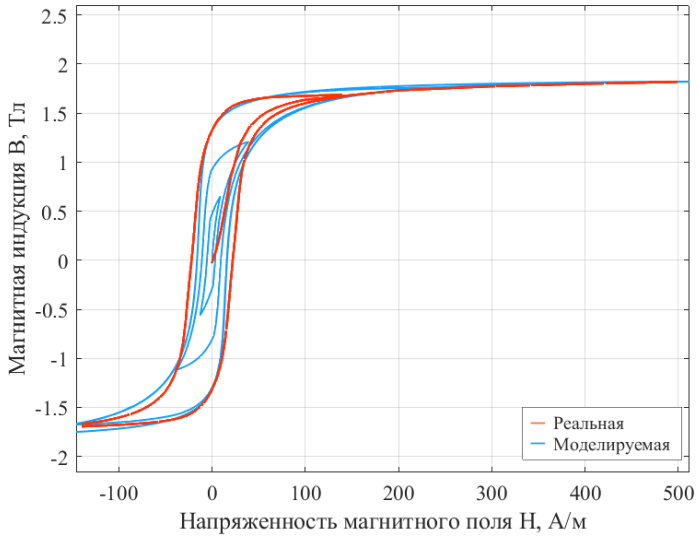


Рис. 4. Кривая намагничивания из документации и моделируемая кривая

3 строит известную основную кривую намагничивания и петлю гистерезиса для 50 Гц. Затем к сердечнику прикладывается переменное напряжение, амплитуда которого плавно увеличивается. На рис. 4 показаны полученные две петли гистерезиса. Оранжевым цветом обозначена петля гистерезиса полученная из технической документации на материал сердечника, а синим цветом показано множество кривых, полученных при заданных коэффициентах модели. Подбор коэффициентов происходит в несколько этапов:

1) из безгистерезисной кривой определяется градиент *B-H* при нулевом значении напряженности магнитного поля;

2) задается одна точка на безгистерезисной кривой в зоне насыщения Hs, Bs;

3) определяется коэффициент обратимого намагничивания *c*, при котором наклон основной кривой намагничивания при малых B и H равен наклону из паспортных данных [12];

4) изменением коэффициента объемной связи *k* задается точка пересечения петли гистерезиса и оси напряженности магнитного поля (коэрцитивная сила) [12];

5) плавно увеличивая коэффициент междоменной связи α настраивается пересечение петли с осью магнитной индукции (значение остаточной индукции) [12];

6) шаги 3–5 повторяются до получения требуемой точности.

Для ускорения процесса подбора параметров материала целесообразно использовать результаты исследования влияния отдельных коэффициент на вид кривой гистерезиса, приведенные в работе [12]. Стоит отметить, что на точность моделирования пуска трансформатора сильнее влияет зона глубокого насыщения

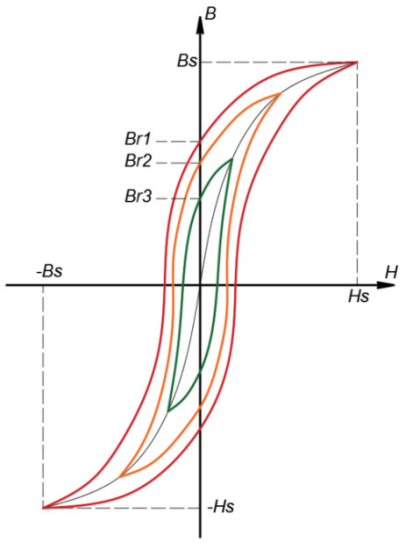


Рис. 5. Кривая гистерезиса и возможные значения остаточной намагниченности

и значение остаточного потока намагничивания.

При моделировании пуска трансформатора в работе [9] значение остаточного потока принимается в диапазоне (0,5–0,7)Фm, однако в современных трансформаторах величина остаточного потока может достигать и больших значений за счет применения материалов с более узкой петлей гистерезиса. На рис. 5 показано семейство кривых намагничивания при различных значениях амплитуды приложенного напряжения. В трансформаторе сечение магнитопровода постоянное, поэтому магнитный поток пропорционален магнитной индукции и далее для большей наглядности будет рассматриваться индукция (не требуется осуществлять переход от $B(H)$ кривой к $\Phi(I_m)$). При работе трансформатора в каждый момент времени существует точка на кривой намагничивания трансформатора, соответствующая текущему значению напряженности магнитного поля и индукции в сердечнике. Если выключение трансформатора происходит при значении напряженности равном или большем, чем значения насыщения H_s, то индукция B упадет до значения, максимальной остаточной индукции $B_{r\ \max}$ (рис. 5). Если в момент выключения напряженность не превышает H_s, то точка перейдет на частную кривую и по этой кривой произойдет переход до значения остаточной индукции $B_r < B_{r\ \max}$.

Для предельного неблагоприятного пуска необходимо ввести в модель максимальное значение остаточного потока, момент выключения должен соответствовать максимальной амплитуде напряженности магнитного поля, которая достигается при максимальном значении тока фазы. Процесс образования остаточной намагниченности (остаточного потока) в стержнях трансформатора при его выключении показан на рис. 6. Из рисунка видно, что в момент времени t = 0,49 с произошло отключение трансформатора от сети. Для стержня 1, соответствующего фазе с максимальным значением тока, остаточная индукция устанавливается равной $B_{r\max}$ = 1,4 Тл, так как в момент отключения напряженность магнитного поля была максималь-

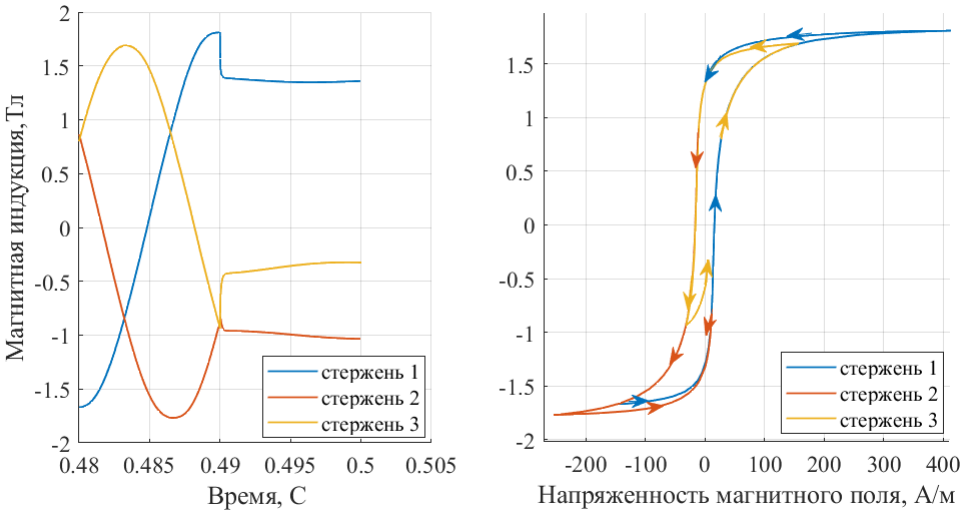


Рис. 6. Формирование максимальной остаточной индукции в стержнях при выключении трансформатора

ной. В двух других стержнях в момент выключения индукция была равна, однако они находились на разных петлях гистерезиса. Индукция в 2 стержне к моменту выключения только прошла пересечение с осью *OY*. То есть стержень уже был намагничен, а напряженность магнитного поля не превысила значения коэрцитивной силы, поэтому при выключении индукция уменьшилась обратно до значения –1 Тл. В другой фаз процесс намагничивания только начался. Напряженность магнитного поля превысила коэрцитивную силу. При выключении произошел переход на частную петлю, соответствующую текущей намагниченности, и по ней произошел переход до точки с остаточной индукцией –0,4 Тл. По закону Кирхгофа для магнитной цепи алгебраическая сумма магнитных потоков в узле (точа соединения трех стержней) равна нулю. Так как сечение ярма и стержней равны, то сумма индукций, как и потоков равняется нулю, правило Кирхгофа для магнитной цепи выполняется. В стержнях трансформатора образуется остаточный поток максимально приближенный к реальному.

Моделирование и анализ результатов моделирования

На основе разработанной модели рассмотрен переходный процесс пуска трансформатора. В качестве трансформатора выбран преобразовательный трансформатор и смоделирован случай намагничивания его через одну из вторичных обмоток от трансформатора предварительного заряда мощностью 20 кВА, активное сопротивление обмоток которого 5,4 Ом, а реактивное 8,7 Ом. Номинальная мощность преобразовательного трансформатора 6,5 МВА. Вторичные обмотки подключены к выпрямителям – определяем их как вентильные, а первичная обмотка – сетевая. Сетевая обмотка разомкнута. Номинальные напряжения вентильных обмоток 1850 В, группы соединения обмоток треугольник, звезда. Материал сердечника nv30s-110s. Параметры обмоток представлены в таблице.

Параметры обмоток

Группа соединения	Звезда BO_1	Треугольник BO_2
Активное сопротивление R, Ом	0,0046	0,014
Индуктивность L, Гн	0,026	0,026
Число витков W	23	39

Наиболее неблагоприятный случай включения трансформатора – это включение в момент перехода напряжения фазы через ноль [13]. На рис. 7 показан процесс пуска трансформаторов. На верхнем графике обозначены токи в обмотках трансформатора, на нижнем магнитный поток в стержнях. Первый пуск (от 0 до 0,45

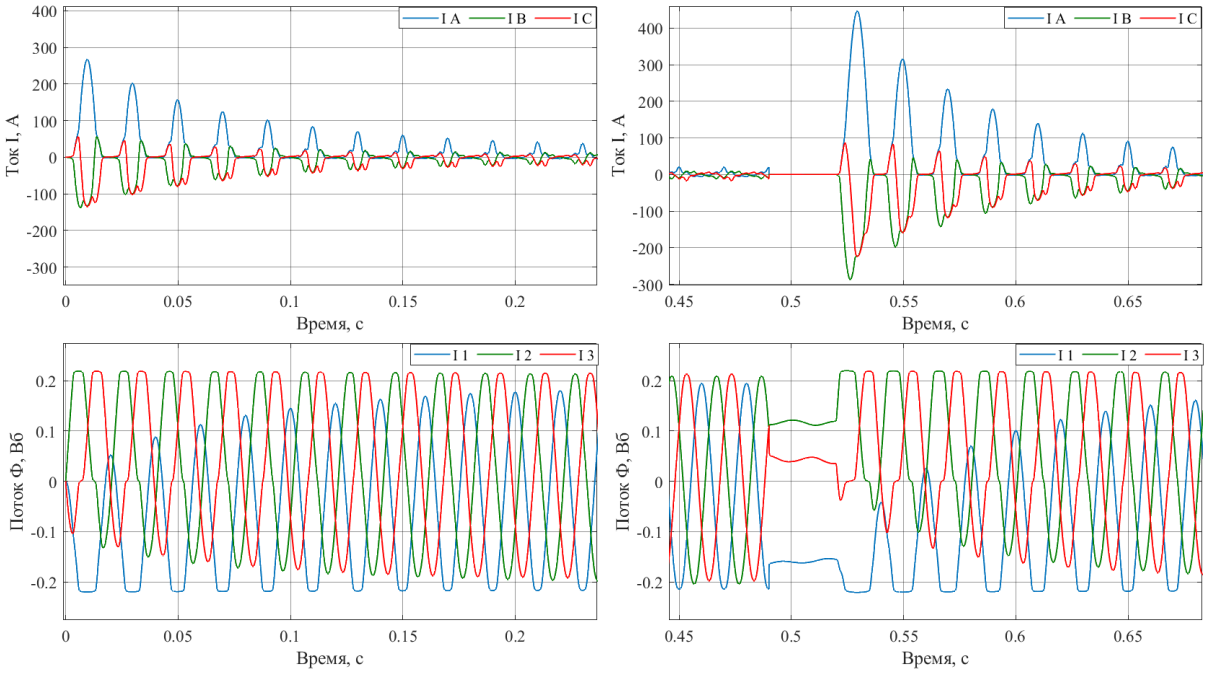


Рис. 7. Изменения тока первичной обмотки и потока в стержнях трансформатора при двух пусках

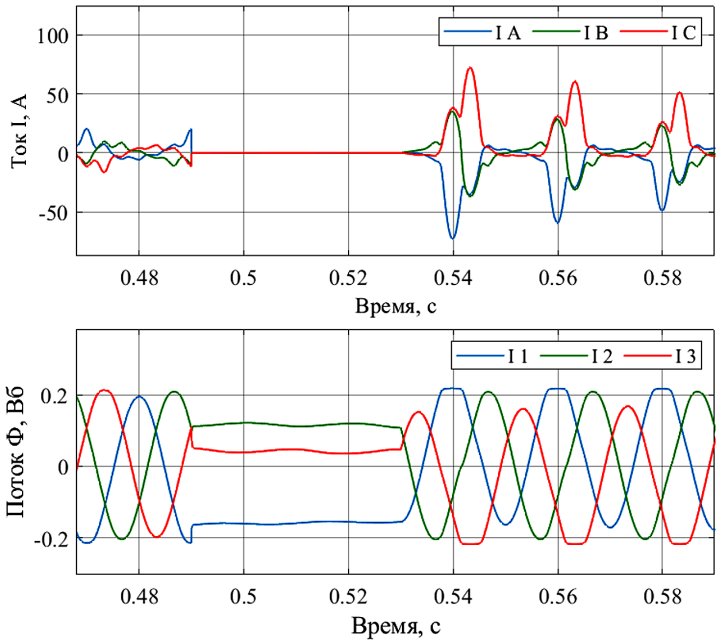


Рис. 8. Ток и поток при встречном включении

с) осуществляется для изучения пуска трансформатора без остаточного потока намагничивания. Результаты моделирования показывают, что при пуске без остаточного потока максимальная амплитуда тока фазы составляет I_{max1} = 267 А ($I_{ном}$ = 400 А). Этот бросок обусловлен только свободной составляющей потока. Затем после завершения переходного процесса (установление симметричного синусоидального потока в стержнях) трансформатор отключается в момент максимума тока (t = 0,49 с). Как было рассмотрено выше, в первом стержне образуется максимальный остаточный поток. Второй пуск соответствует самому неблагоприятному случаю пуска. Включение происходит в момент перехода напряжения фазы че-

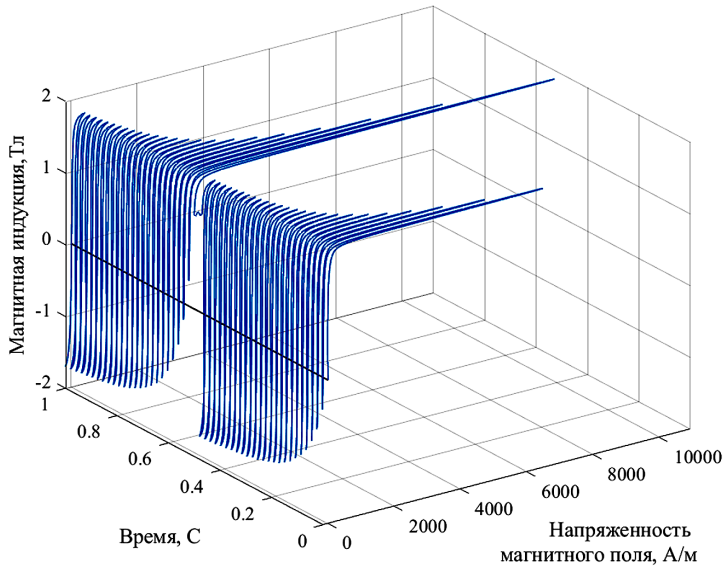


Рис. 9. График, показывающий состояние стержня во время двух пусков

рез ноль (t = 0,52 с), остаточный поток оказывается сонаправлен с рабочим. Остаточный поток при втором пуске составляет 0,78 от номинального. Увеличение результирующего потока после второго пуска привело к броску пускового тока I_{max1} = 447 А ($I_{ном}$ = 400 А). Большее значение тока обусловлено насыщением сердечника, при котором небольшое увеличение индукции в стержне приводит к стремительному росту напряженности магнитного поля.

На рисунке 8 показан аналогичной опыт рассмотренному выше для случая, при котором остаточный магнитный поток не сонаправлен с рабочим. При этом амплитуда пускового тока снижается из-за ослабления результирующего потока в стержне. Максимальное значение тока составила 72 А, что практически в 3,5 раза меньше, чем при пуске без остаточного потока в трансформаторе.

Для наглядности на рис. 9 показан график, отражающий временную зависимость индукции и напряженности магнитного поля для первого опыта. Видно, что при первом пуске максимальная амплитуда напряженности поля меньше, чем при втором, что соотносится с кривыми токов, которые были рассмотрены ранее. Это может быть применено для определения потерь мощности перемагничивания по площади петли гистерезиса в каждый момент времени.

Заключение

В ходе работы были рассмотрены основные типы математических моделей для моделирования трансформаторов. Ограничения по количеству и группам соединений обмоток, а также сложности учета остаточного потока в трансформаторе не позволяют в полной мере решать задачи моделирования пуска преобразовательных трансформаторов. В статье предложена уточненная модель трансформатора и проведены опыты прямого пуска трансформатора с учетом остаточного магнитного потока намагничивания. Получены следующие результаты.

1. Разработана уточненная математическая модель трансформатора с использованием модели Джайлса – Атертона, позволяющая повысить точность моделирования электромагнитных переходных процессов трансформатора при его пуске.

2. Применение модели Джайлса – Атертона позволяет получать наиболее приближенные к практике значения остаточного потока в стержнях. В отличие от других моделей, в которых значения остаточного потока указываются независимо для каждого стержня, в полученной модели потоки связаны с между собой и состоянием до выключения.

3. Повышение точности моделирования электромагнитных переходных процессов трансформатора достигнуто благодаря более полному учету состояния магнитной системы трансформатора, а также учету электрических нагрузок трансформатора перед его выключением. Учет остаточного потока увеличил значения пусковых токов в 1,7 раза для данного трансформатора.

4. Разработанная модель имеет возможность регистрировать магнитные состояния каждого стержня сердечника магнитопровода отдельно.

5. Разработанная модель трансформатора позволяет выполнить с достаточно высокой точностью моделирование более сложных переходных процессов трансформатора, например, моделирование процессов плавного пуска трансформатора с использованием тиристорного регулятора напряжения или балластных резисторов.

Список источников

1. The impact of iron core model on dynamic behavior of three-phase power transformer dynamic model / K. Deželak [et al.] // IEEE transactions on magnetics. 2015. № 51. P. 1–4.

2. Topology-correct reversible transformer model / S. Zirka [et al.] // IEEE Transactions on power Delivery. 2012. № 27. P. 2037–2045.

3. 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). 2011. P. 18–27.

4. Topological reversible model of three-phase five-limb transformer / S. Zirka [et al.] // Electrical engineering and power engineering. 2018. P. 6–13

5. Topological transient models of three-phase five-limb transformer / S. Zirka, Y. I. Moroz. C. Arturi, D. Bonnman // Electrical engineering and power engineering. 2018. P. 18–25

6. *Подобный А. В.* Методика создания цифровых двойников трансформаторов на основе корректируемых по результатам эксперимента имитационных моделей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2022. 20 с.

7. *Снитько И. С.* Разработка методики расширенного поверочного расчета в САПР силовых трансформаторов на базе имитационных моделей: дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2022. 154 с.: ил.

8. *Ярымбаш С. Т., Килимник И. М.* Моделирование электромагнитных процессов при работе силовых трансформаторов под нагрузкой и в режиме хо-

лостого 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.

10. *Saraiva E., Chaves M. L., Camacho J.* Three-phase transformer representation using FEMM, and a methodology for air gap calculation // Proceedings of 18th International conference on electrical machines (ICEM – 2008). 2008. P. 18–27.

11. *Славутский А. Л.* Учет остаточной намагниченности в трансформаторе при моделировании переходных процессов // Вестн. ЧГУ. 2015. № 1. С. 122–130.

12. *Gans Š., Molnár J., Kováč D.,* Estimation of Jiles – Atherton parameters of toroid cores using MATLAB/Simulink // ACTA PHYSICA POLONICA A. 2023. Vol. 143, № 5. P. 389–39.

13. *Котенеев С., Евсеев А.* Переходные процессы при включении трансформатора в сеть с синусоидальным напряжением // Силовая электроника. 2005. № 4 (34). С. 34–37.

УДК 621.313 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-259-262**

С. С. Тимофеев*
старший преподаватель
Я. В. Клинов*
студент
С. К. Шорохов*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПОСТРОЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОДЧИНЕННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТОПРОВОДА

Рассматривается построение механической характеристики с учетом увеличения магнитного потока, вызванного действием реакции якоря. Испытания проведены на электроприводе с подчиненным регулированием.
Ключевые слова: *механическая характеристика, магнитное насыщение, подчиненное регулирование, двигатель постоянного тока.*

S. S. Timofeev*
Senior Lecturer
Y. V. Klinov*
Student
S. K. Shorokhov*
Student
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

CONSTRUCTION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF AN ELECTRIC DRIVE WITH SUBORDINATE REGULATION, TAKING INTO ACCOUNT THE SATURATION OF THE MAGNETIC CIRCUIT

The paper considers the construction of a mechanical characteristic taking into account the increase in the magnetic flux caused by the action of the armature reaction. The tests were carried out on an electric drive with subordinate regulation.
Keywords: *mechanical characteristic, magnetic saturation, subordinate regulation, DC-motor.*

Введение

В учебных пособиях и при изучении студентами электрических машин механические характеристики $\omega=f(M)$ строятся с допущением. Электромагнитный момент двигателя постоянного тока определяется как [1]:

$$M = c_{\text{м}} \Phi I_a,$$

где магнитный поток принимается неизменным (Φ = const), а $c_{\text{м}}\Phi$ рассчитывается для идеального холостого хода (M=0, $I_{\text{а}}$=0):

$$c_{\text{м}} \Phi = \frac{U}{\omega_0}.$$

При увеличении нагрузки на валу двигателя возрастает ток в цепи якоря $I_{\text{а}}$, что вызывает увеличение реакции якоря. Ток реакции якоря $\Delta I_{\text{в}}$ добавляется к току обмоток возбуждения $I_{\text{в}}$, вследствие чего изменяется магнитный поток Φ в соответствии с магнитной характеристикой двигателя.

В данной работе механическая характеристика исследуется для электропривода постоянного тока с подчиненным регулированием.

Построение электромеханической и механической характеристик

На рис. 1 приведена принципиальная схема испытательного стенда. Двигатель постоян-

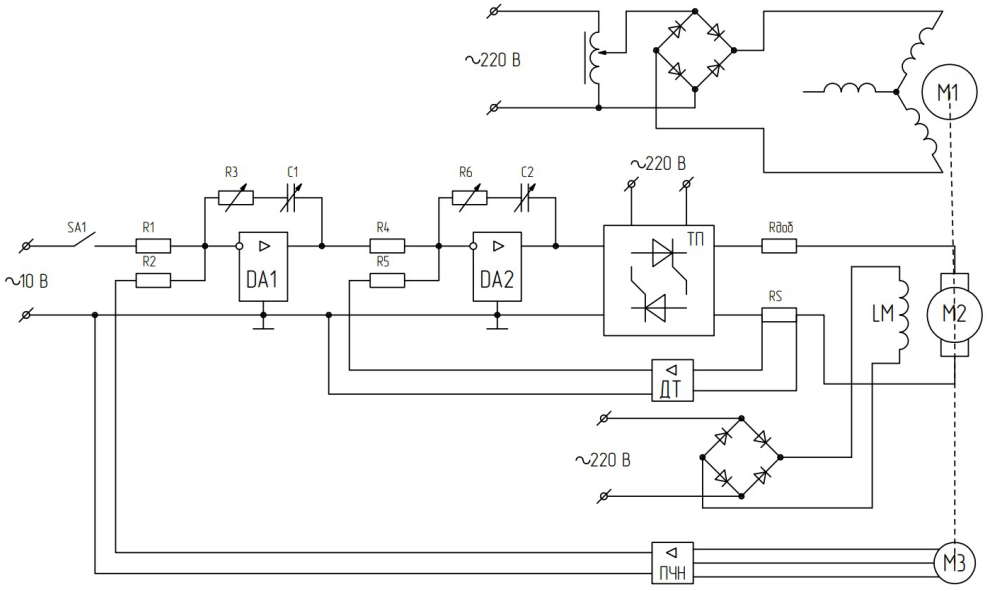


Рис. 1. Принципиальная схема испытательного стенда

ного тока *M2* с независимым возбуждением от обмотки *LM*. В цепь якоря введено добавочное сопротивление $R_{доб}$=50 Ом. На операционном усилителе *DA1* реализуется ПИ-регулятор скорости, на операционном усилителе *DA2* – ПИ-регулятор тока [2]. Контур тока подчинен контуру скорости. Выходное напряжение регулятора тока является напряжением управления тиристорного преобразователя ТП. Асинхронная машина *M1* работает в режиме динамического торможения. Пуск системы осуществляется ключом *SA1*.

Строится электромеханическая характеристика $\omega=f(I_a)$, которая оказывается пропорциональной механической характеристике $\omega=f(M)$ в случае, если Ф=const.

На рис. 2 изображены электромеханические характеристики для системы с ПИ-регулированием контуров тока и скорости и для системы с П-регулированием обоих контуров.

ПИ-регулирование обеспечивает большую жесткость электромеханической характеристики и большее значение тока отсечки $I_{отс}$ в сравнении с П-регулированием.

Характеристика снята для системы с электромеханическим преобразователем ПЛ-072 УЗ, для которого известна аппроксимированная зависимость тока реакции якоря от тока якоря [2]:

$$\Delta I_в = 0{,}1523 I_a^3 + 7{,}417 \cdot 10^{-15} I_a^2 - \\ -0{,}02619 I_a + 0{,}03355.$$

Из данной зависимости строится график (рис. 4).

Строится магнитная характеристика $\Phi=f(I_в)$ (рис. 4). Коэффициент насыщения магнитной цепи машины постоянного тока k_μ=1,3. Точка ($I_{в0}$,Φ_0) соответствует холостому ходу, точка ($I_{вн}$,$\Phi_н$) – номинальному току якоря, где

$$I_{вн} = I_{в0} + \Delta I_в \text{ при } I_{ан} = 1{,}3 \text{ А}.$$

Таким образом, току якоря $I_а$ сопоставляется ток реакции якоря $\Delta I_в$, которому, в свою очередь, сопоставляется ток возбуждения $I_в$, а ему – магнитный поток Ф.

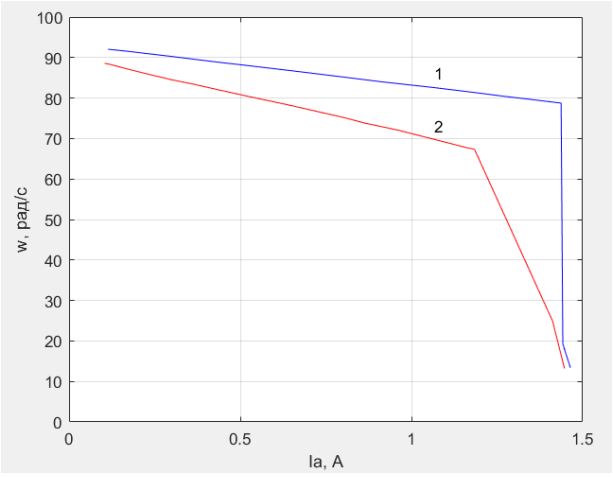


Рис. 2. Электромеханические характеристики: 1 – для системы с ПИ-регулированием; 2 – для системы с П-регулированием

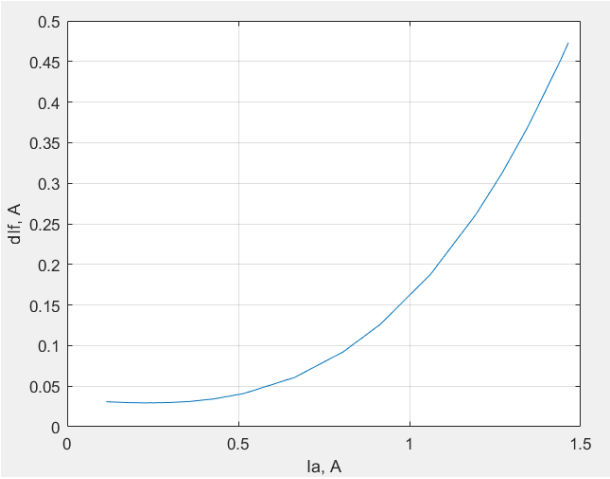


Рис. 3. График зависимости тока реакции якоря от тока якоря

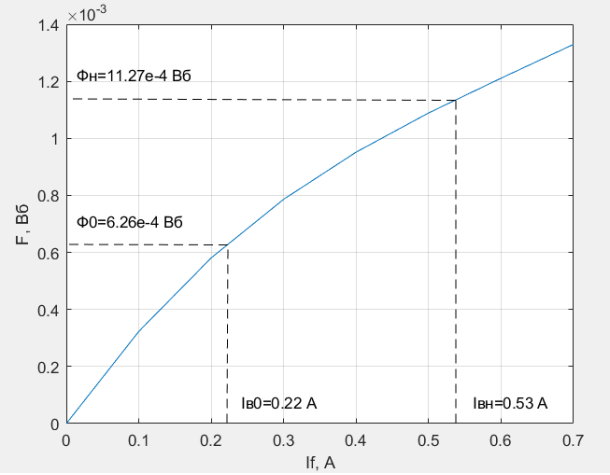


Рис. 4. Магнитная характеристика электродвигателя

Электромеханическая характеристика преобразуется к механической характеристике (рис. 5) с учетом изменения магнитного потока Ф.

Участки, которые являются линейными в электромеханической характеристике и механической характеристике при постоянном магнитном потоке, приобрели криволинейный характер. Причем кривизна стремится к началу графиков, к малым значениям момента M. Это объясняется тем, при малых значениях момента M имеют место небольшие значения тока якоря $I_а$, с возрастанием которого возрастает реакция якоря, и обмотки возбуждения обретают значения тока $I_в$, при которых магнитная характеристика начинает искривляться. Чем больше коэффициент насыщения магнитной цепи k_μ, тем больше кривизна магнитной характеристики и, соответственно, тем больше кривизна механической характеристики в области малых значений момента.

Сравнение механических характеристик при динамическом и статическом магнитном потоке Ф

На рис. 6 представлено сравнение механических характеристик для системы с ПИ-регулированием при динамическом и статическом магнитном потоке Ф.

При небольшом коэффициенте насыщения магнитной цепи k_μ магнитный поток Ф сильно увеличивается при увеличении тока возбуждения $I_в$ (реакции якоря), отчего также сильно возрастает электромагнитный момент. Так, при одинаковом значении тока отсечки $I_{отс}$=1,4 А

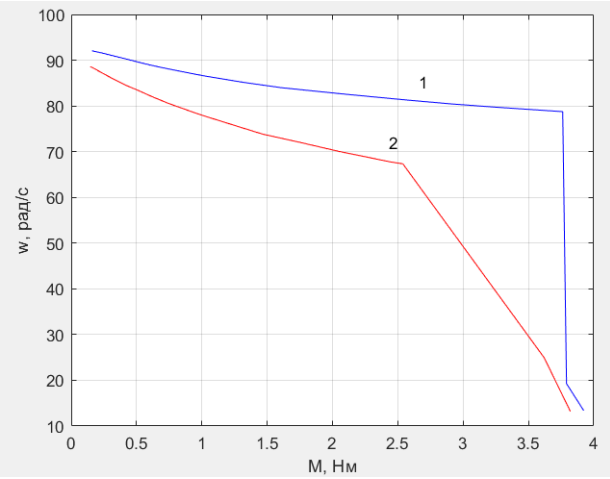


Рис. 5. Механические характеристики: 1 – для системы с ПИ-регулированием; 2 – для системы с П-регулированием

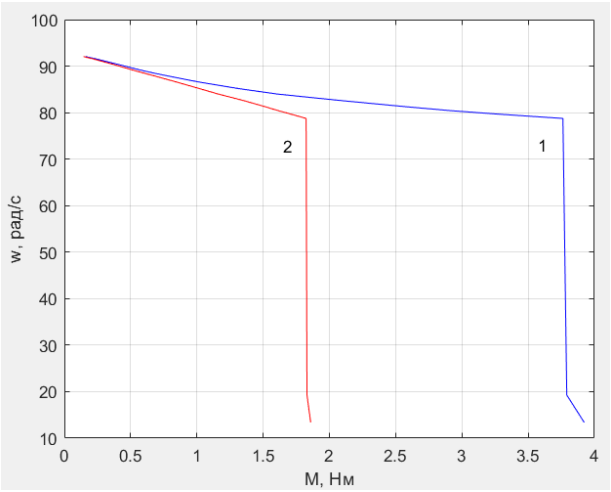


Рис. 6. Механические характеристики системы с ПИ-регулированием: 1 – при динамическом Ф; 2 – при статическом Ф

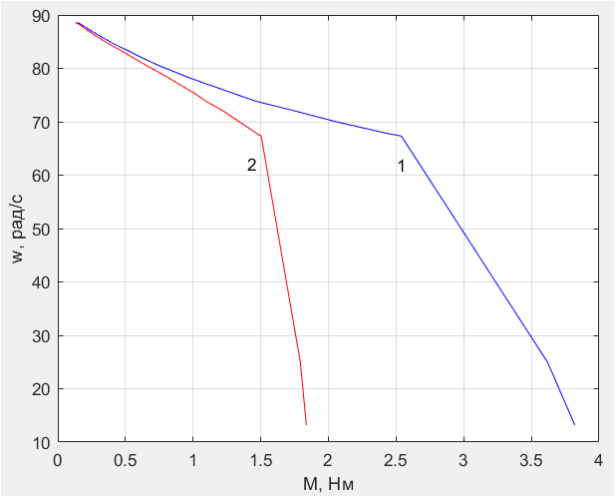


Рис. 7. Механические характеристики системы с П-регулированием: 1 – при динамическом Ф; 2 – при статическом Ф

момент M при динамическом магнитном потоке Ф равен 3,7 Нм, а при магнитном потоке Ф, принятом статическим – 1,8 Нм. Таким образом, электропривод выдерживает большую нагрузку на валу, чем ту, о которой можно судить, исходя из механической характеристики, построенной при статическом магнитном потоке Ф.

На рис. 7 представлено сравнение механических характеристик для системы с П-регулированием при динамическом и статическом магнитном потоке Ф.

При одинаковом значении тока отсечки $I_{отс}$=1,2 А момент M при динамическом магнитном потоке Ф равен 2,6 Нм, а при магнитном потоке Ф, принятом статическим – 1,5 Нм.

Заключение

ПИ-регулирование обеспечивает большую жесткость электромеханической характеристики и большее значение тока отсечки $I_{отс}$ в сравнении с П-регулированием. При небольшом коэффициенте насыщения магнитной цепи k_μ магнитный поток Ф сильно увеличивается при действии реакции якоря, тогда сильно возрастает электромагнитный момент M. Так, механическая характеристика, построенная в соответствии с увеличивающимся магнитным потоком Ф, обладает большим диапазоном момента M. Значит, электропривод может быть нагружен сильнее. При большом коэффициенте насыщения магнитной цепи k_μ увеличение тока вблизи номинальных значений приводит к малому возрастанию магнитного потока Ф, тогда электромагнитный момент M также возрастает не так сильно. При этом такая механическая характеристика обладает более выпуклым изгибом, который концентрируется к началу характеристики, к малым значениям момента.

Очевидно, из представленного выше, что во всех математических моделях необходимо учитывать, что коэффициент передачи двигателя является нестационарным и сильно зависит от реакции якоря. Согласно полученным результатам, влияние динамики данного коэффициента на характеристики находится в пределах 30–40 %.

Список источников

1. *Вольдек А. И., Попов В. В.* Электрические машины. Машины переменного тока. СПб.: Питер, 2008. 350 с.

2. *Егупов Н. Д.* Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 736 с.

3. Учет в математических моделях влияния реакции якоря двигателя постоянного тока / Н. В. Решетникова, И. А. Шишков, А. Г. Панкратов, М. А. Монахов // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Материалы XXVI Междунар. науч. конф.: в 3 ч. Ч. 1. СПб., 2023. С. 196–202.

УДК 62-83 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-263-269**

С. С. Тимофеев*
старший преподаватель
Д. С. Швецов*
студент
И. А. Шишков*
студент
А. Г. Панкратов*
студент
М. А. Монахов*
студент
К. С. Никитина*
студент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассмотрено определение параметров тиристорного преобразователя как ключевого компонента в системах электропривода. Тиристорные преобразователи являются принципиальными элементами, используемыми для преобразования электрической энергии в системах управления электроприводами.
Ключевые слова: *тиристорный преобразователь, двигатель постоянного тока, электропривод, моделирование, постоянные времени, регулирование, переходный процесс.*

S. S. Timofeev*
Senior Lecturer
D. S. Shvetsov*
Student
I. A. Shishkov*
Student
A. G. Pankratov*
Student
M. A. Monakhov*
Student
K. S. Nikitina*
Student
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DETERMINATION OF PARAMETERS OF THYRISTOR CONVERTER FOR USE IN ELECTRIC DRIVE SYSTEM

The article deals with the determination of thyristor converter parameters as a key component in electric drive systems. Thyristor converters are principal elements used for electric energy conversion in electric drive control systems.
Keywords: *thyristor converter, DC motor, electric drive, modeling, time constants, regulation, transient process.*

Развитие современной промышленности, сельского хозяйства и транспорта невозможно без использования автоматизированных электроприводов. В настоящее время основная часть используемых в производстве регулируемых электроприводов – это электрические двигатели постоянного тока и вентильные с постоянными магнитами.

Актуальность данного исследования обусловлена тем, что тиристорные преобразователи часто применяются в системах электропривода. Поэтому важно уметь определять его параметры и анализировать их, это поможет для дальнейшей настройки системы управления. А также в необходимости разработки и применения эффективных методов определения пара-

метров тиристорного преобразователя для обеспечения надежной и энергоэффективной работы системы электропривода. Корректно подобранные параметры тиристорного преобразователя позволяют снизить энергопотери, повысить энергоэффективность и точность управления, а также улучшить общую производительность электропривода.

Объектом исследования является тиристорный преобразователь для электрического привода, в основе которого лежит двигатель постоянного тока ПЛ-072 У3.

Цели исследования: построить внешние характеристики датчиков тока и напряжения, получение внешней характеристики преобразователя.

Задачи исследования: изучение схемы тиристорного преобразователя, определение передаточной функции преобразователя.

Используемый тиристорный преобразователь выполнен в виде модуля для лабораторного стенда и может выполнять не только функции преобразователя (рис. 1; 2).

Рассмотрим принципиальную электрическую схему тиристорного преобразователя (рис. 3).

Для начала необходимо получить внешние характеристики датчиков тока и напряжения. Данные датчики будут использоваться для реа-

а) б)

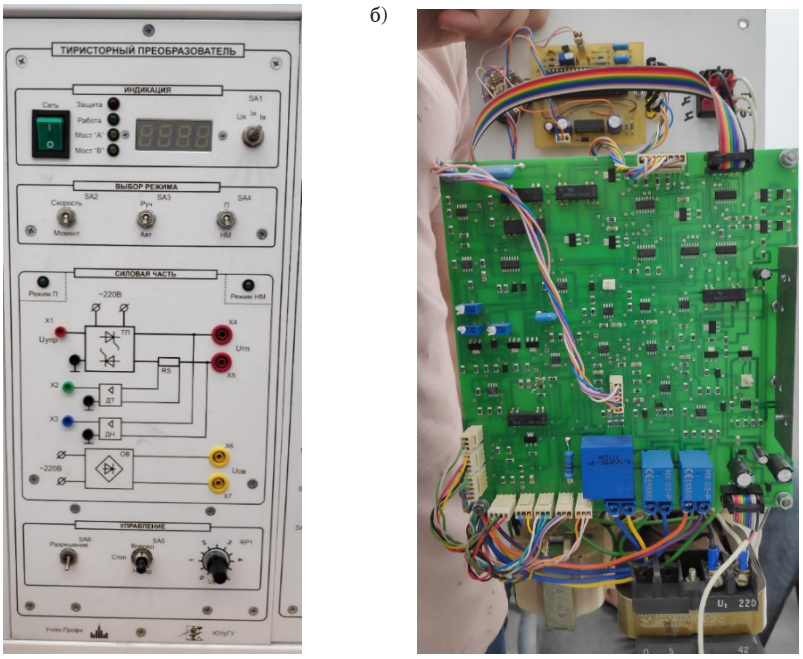


Рис. 1. Модуль тиристорного преобразователя: а – вид спереди; б – вид сзади

Рис. 2. Тиристоры, установленные на радиатор

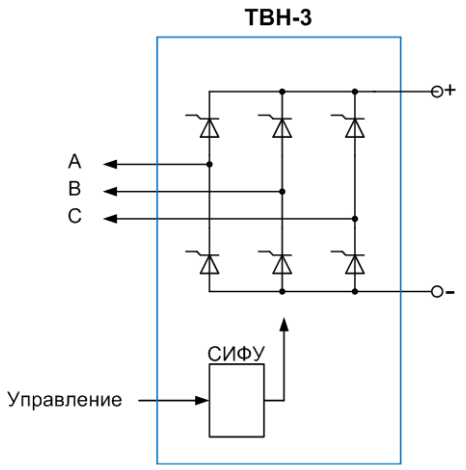


Рис. 3. Принципиальная схема

лизации обратных связей, которые будут заводиться на контакты управления тиристорного преобразователя.

Внешняя характеристика датчика напряжения приведена на рис. 4.

Внешняя характеристика датчика тока приведена на рис. 5.

С помощью полученных характеристик сможем определить коэффициенты датчиков тока и напряжения. Данные коэффициенты пригодятся при создании модели электропривода.

Можем сделать вывод, что полученные характеристики являются линейными (у внешней характеристики датчика тока есть небольшие отклонения от линейного закона, однако

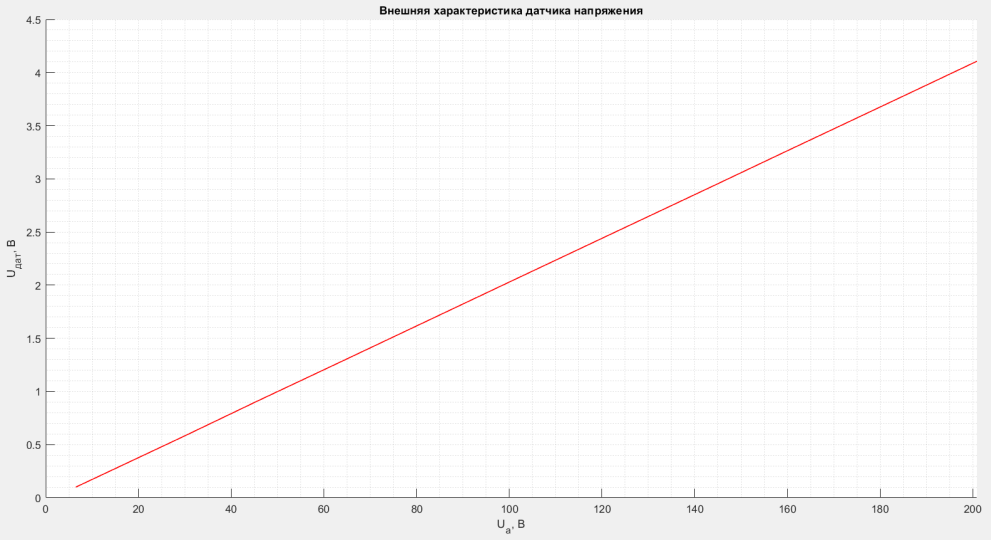


Рис. 4. Характеристика датчика напряжения

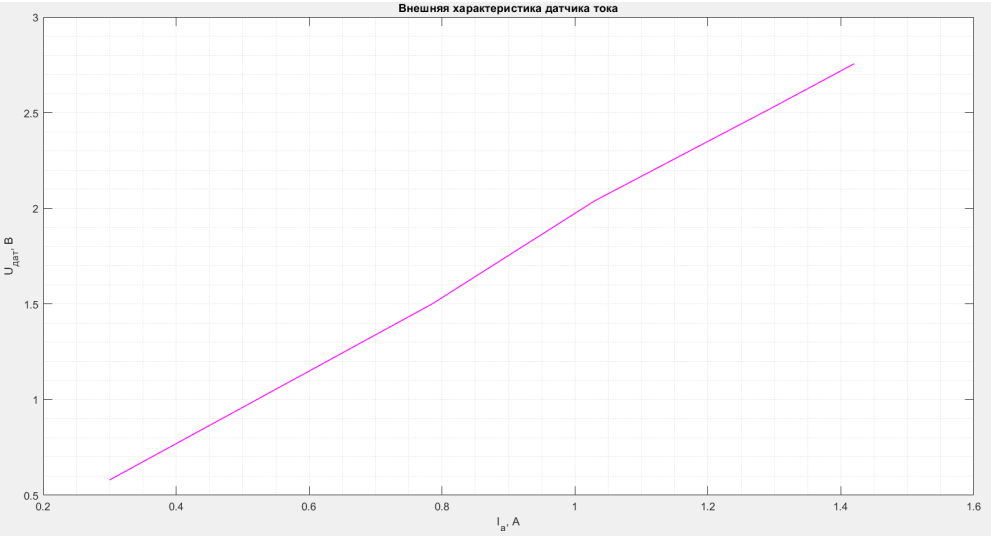


Рис. 5. Характеристика датчика тока

они не значительные и не нуждаются в особом внимании).

Теперь подключаем осциллограф к датчику напряжения и получаем график, представленный на рис. 6. Эксперимент проводился при $U_{вх} = 4$ В, $U_{вых} = 135$ В.

Данная осциллограмма позволит определить электрическую постоянную времени тиристорного преобразователя.

Определив данную постоянную времени и сравнив ее с постоянной времени используемого двигателя, сможем сделать вывод, нужно ли учитывать преобразователь как передаточную функции или можно ограничиться использованием коэффициента усиления [1].

Для полученного графика выполним фильтрацию шумов (рис. 7).

Необходимо определить постоянную времени тиристорного преобразователя. Для этого построим касательную к графику переходного процесса (рис. 8).

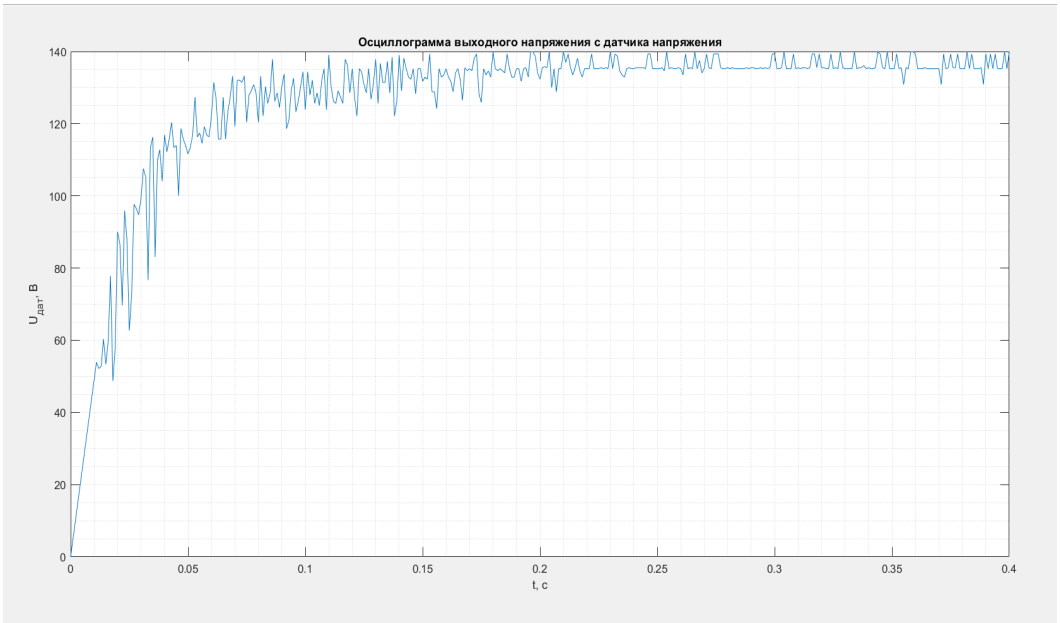


Рис. 6. Осциллограмма выходного напряжения с датчика напряжения

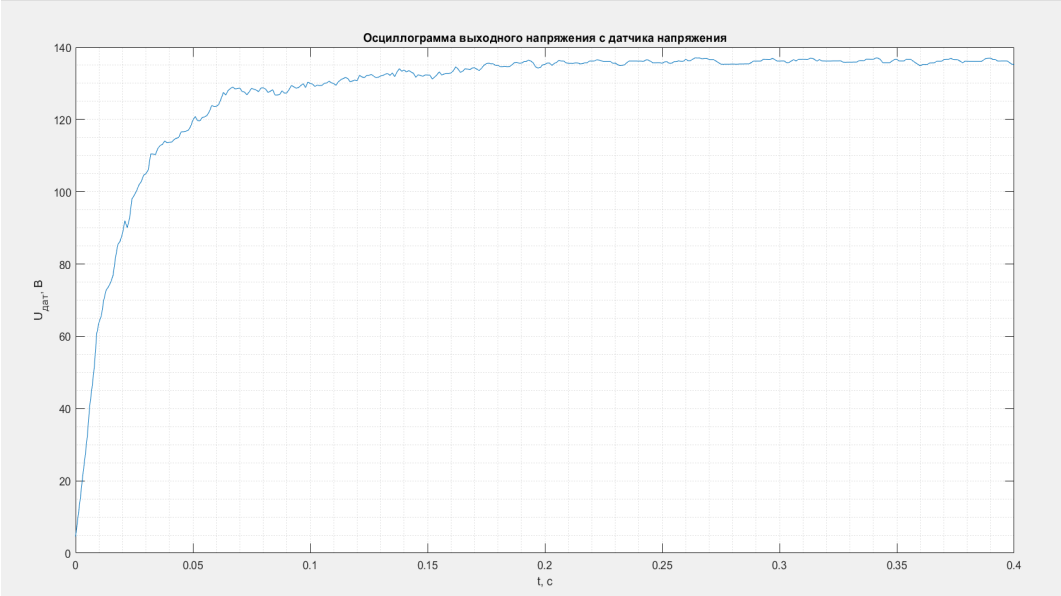


Рис. 7. Осциллограмма выходного напряжения с датчика напряжения (после фильтрации)

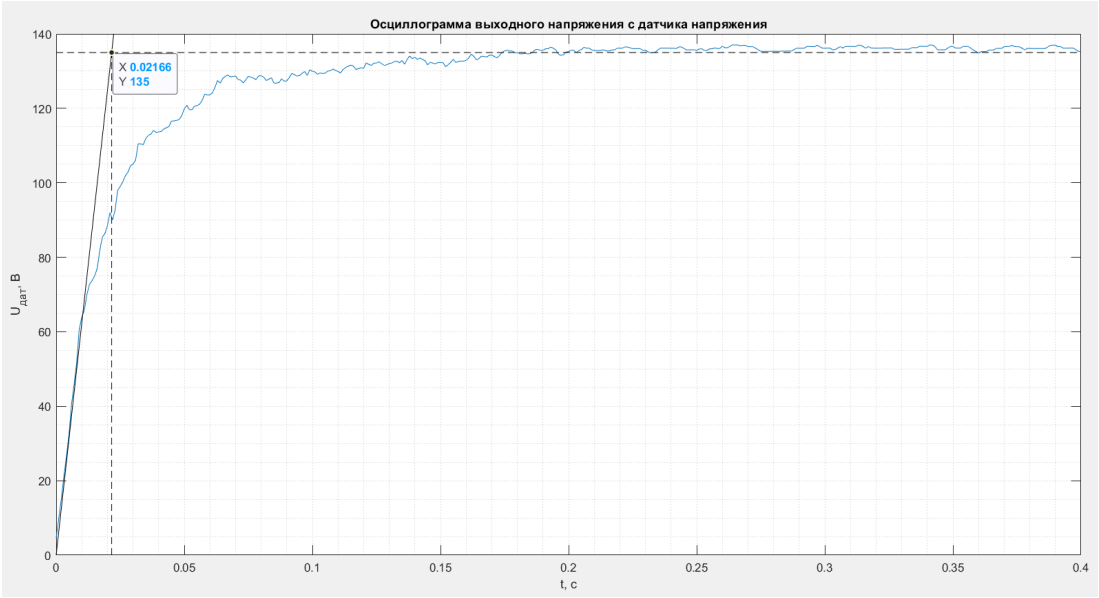


Рис. 8. Определение постоянной времени

Постоянная времени тиристорного преобразователя равна: $T_{тр}$=0,02166 с.

Произведем расчет электрической и электромеханической постоянных времени используемого двигателя. Параметры двигателя приведены в таблице.

Характеристики электромеханического преобразователя

Ra, Ом	*La*, Гн	C_eФ	*J*, Н·м
26	$308 \cdot 10^{-3}$	1,182	$9{,}945 \cdot 10^{-4}$

Электрическая постоянная времени двигателя:

$$T_Э = \frac{L_a}{R_a} = \frac{308 \cdot 10^{-3}}{26} = 0{,}012 \text{ с.}$$

Электромеханическая постоянная времени двигателя:

$$T_M = \frac{JR_a}{(C_e\Phi)^2} = \frac{9{,}945 \cdot 10^{-4} \cdot 26}{(1{,}182)^2} = 0{,}01851 \text{ с.}$$

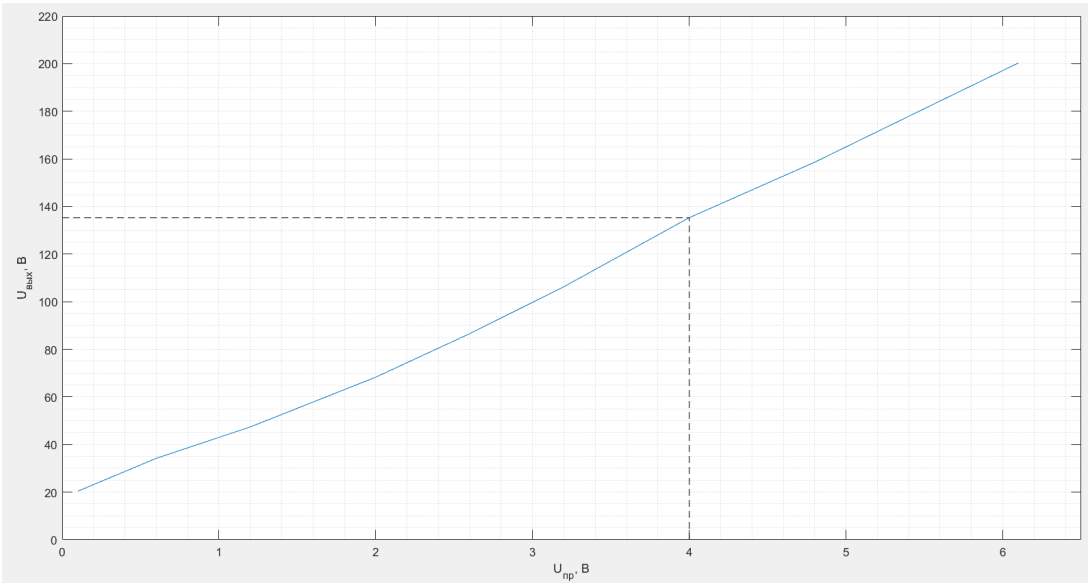


Рис. 9. Внешняя характеристика преобразователя

Как видим, полученная электрическая постоянная времени преобразователя больше, чем у двигателя. Поэтому при составлении модели необходимо учитывать преобразователь как отдельную ПФ [2].

Для того, чтобы составить передаточную функцию преобразователя необходимо знать его коэффициент усиления.

Получим внешнюю характеристику преобразователя, то есть зависимость выходного напряжения от входного напряжения на преобразователя (рис. 9). Она будет необходима для нахождения коэффициента усиления тиристорного преобразователя.

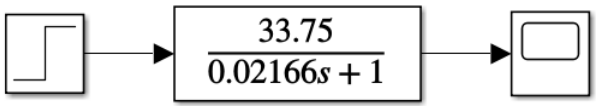


Рис. 10. Модель тиристорного преобразователя

Из графика на рис. 9 определяем коэффициент усиления для передаточной функции тиристорного преобразователя (проводим перпендикуляры до точки со значениями, при которой проводился эксперимент):

$$k_{тр}=33,75.$$

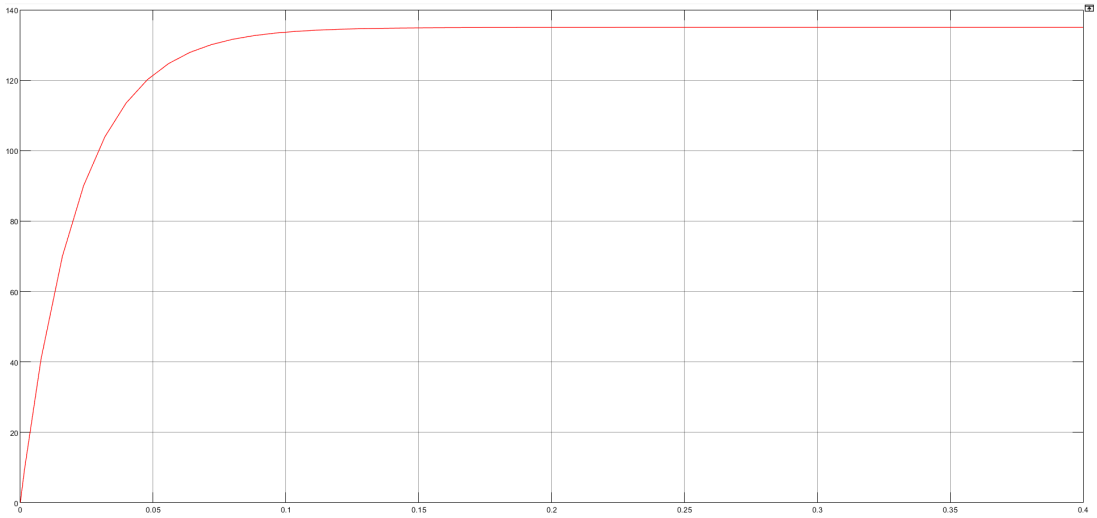


Рис. 11. Переходный процесс модели тиристорного преобразователя

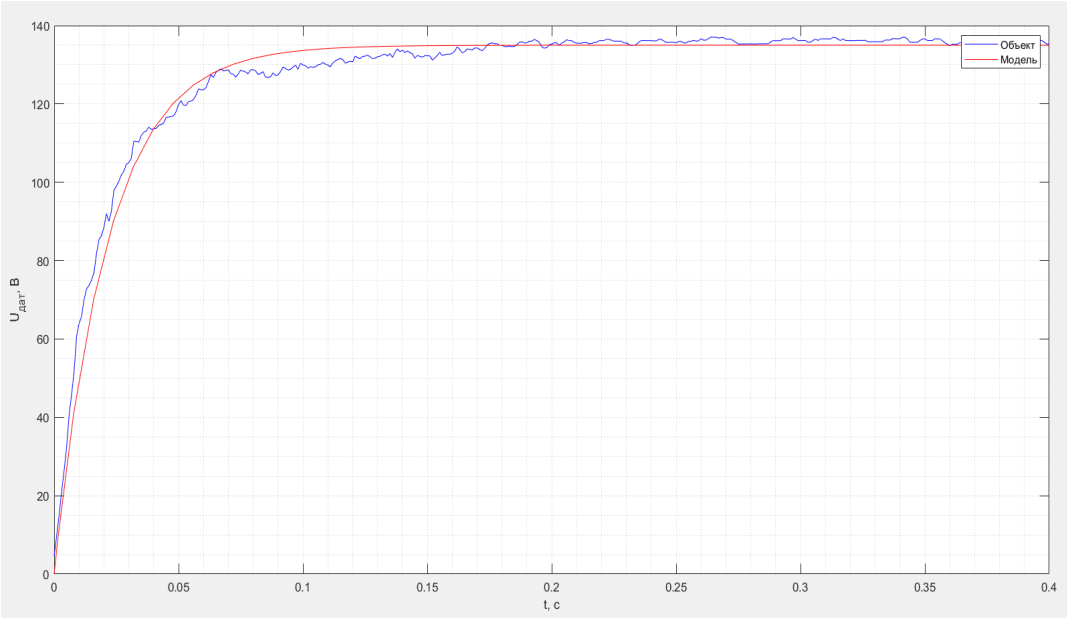


Рис. 12. Сравнение графиков переходных процессов

Теперь имеем все необходимые данные, чтобы составить передаточную функцию, которая будет описывать тиристорный преобразователь. Модель приведена на рис. 10.

Переходный процесс, полученный путем моделирования в пакете MatLab Simulink приведен на рис. 11.

Объединим графики реального эксперимента и модели для наглядности и удобства их сравнения (рис. 12).

Как видно из рисунка 12 присутствует расхождение двух графиков. Это объясняется тем, что при определении постоянной времени касательная была проведена к сглаженному апериодическому переходному процессу, что повлияло на точность ее определения.

Коэффициент усиления апериодического звена (коэффициент преобразователя) определялся при помощи внешней характеристики тиристорного преобразователя, значение выходного напряжения делилось на значение входного.

С учетом полученной передаточной функции тиристорного преобразователя можем составить структурную схему разомкнутого электропривода.

Зная характеристики используемого двигателя, можем перейти к составлению модели в среде MatLab Simulink. Постоянные времени были рассчитаны выше.

Коэффициент передачи двигателя находится как:

$$k_{\text{дв}} = \frac{1}{C_e \Phi} = \frac{1}{1{,}182} = 0{,}846.$$

Заключение

Из результатов исследования можно сделать вывод, что при рассмотрении электропривода тиристорный преобразователь играет важную роль.

Необходимо анализировать постоянную времени преобразователя и сравнивать с значением постоянной времени двигателя, чтобы понимать необходимость его учитывания в виде передаточной функции при выполнении моделирования. Передаточная функция преобразователя является апериодическим звеном первого порядка.

Список источников

1. *Дементьев Ю. Н., Чернышев А. Ю., Чернышев И. А.* Электрический привод: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 232 с.

2. *Мартынов А. А.* Электрический привод: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2015. 524 с.

3. *Вольдек А. И.* Электрические машины. М.: Энергия, 1974. 840 с.

4. *Тимофеев С. С.* Определение собственного сопротивления обмотки якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения. СПб.: ГУАП, 2023. 9 с.

УДК 62-83 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-270-275**

С. С. Тимофеев*
старший преподаватель
И. А. Шишков*
студент
Д. С. Швецов*
студент
А. Г. Панкратов*
студент
М. А. Монахов*
студент
К. С. Никитина*
студент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ЭЛЕКТРОПРИВОД С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО СКОРОСТИ

Рассматриваются электропривод с обратной связью по скорости, моделирование данной системы, а также ее практическая реализация.
Ключевые слова: *электропривод, двигатель постоянного тока, преобразователь, обратная связь, моделирование, MatLab Simulink, регулирование.*

S. S. Timofeev*
Senior Lecturer
I. A. Shishkov*
Student
D. S. Shvetsov*
Student
A. G. Pankratov*
Student
M. A. Monakhov*
Student
K. S. Nikitina*
Student
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ELECTRIC DRIVE WITH SPEED FEEDBACK

This article considers closed-loop electric drive with speed feedback as a key element of modern technical systems and production processes. Modeling of this system and its practical realization are considered.
Keywords: *electric drive, DC motor, converter, feedback, modeling, MatLab Simulink, regulation.*

Введение

В современном мире электроприводы являются неотъемлемой частью множества технических систем и производственных процессов. Они обеспечивают управление скоростью и точностью движения различных механизмов, их позиционирование и контроль. Одним из ключевых аспектов, влияющих на эффективность и качество работы электропривода, является использование обратной связи по скорости.

Основная задача электроприводов с обратной связью по скорости заключается в точном поддержании заданной скорости вращения двигателя или угла поворота независимо от возможных изменений нагрузки или других внешних факторов. Датчик в реальном времени измеряет текущую скорость вращения и передает значение на сравнивающее устройство.

Электроприводы с обратной связью по скорости широко используются в робототехнических системах, в сфере промышленности и автома-

Рис. 1. ПЛ-072 У3

тизации, где необходимо точное и динамичное управление движением.

Объектом исследования является система электрического привода, в основе которой лежит двигатель постоянного тока ПЛ-072 У3, тиристорный преобразователь, тахогенератор и регулятор.

Целями исследования являются: построение модели в MatLab Simulink, получение переходного процесса системы; построение механической характеристики.

Задачи исследования: изучение структуры электропривода; сравнение результатов моделирования с экспериментом.

Объектом управления будет являться двигатель постоянного тока ПЛ-072 У3, который изображен на рис. 1.

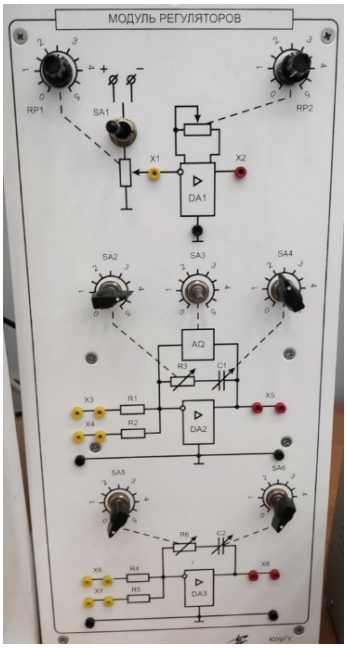
В качестве регулятора скорости, а также сравнивающего устройства будет использоваться модуль регуляторов лабораторного стенда (рис. 2, *а*). Данный модуль имеет задатчик напряжения, а также ПИ-регулятор с возможностью выставления ограничения для избежания интегрального насыщения. В роли преобразователя будет выступать тиристорный преобразователь (рис. 2, *б*), который позволит осуществлять регулирование напряжения якорной цепи за счет управляющего сигнала, который будет формировать регулятор.

Также в нашей системе необходим датчик оборотов, которым выступает инкрементальный энкодер, представленный на рис. 3. Стоит заранее отметить, что такой датчик предназначен для определения угла поворота и использование его в качестве датчика скорости может оказаться не совсем корректным.

Математическая модель

Передаточная функция ПИ-регулятора, реализованного на операционном усилителе:

а)



б)

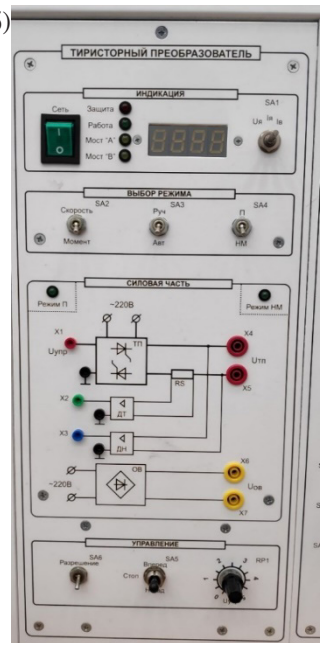


Рис. 2. Модули стенда: а – регулятор; б – тиристорный преобразователь

Рис. 3. Инкрементальный энкодер в роли датчика скорости

$$W_p(p) = K_p \frac{\tau_1 p + 1}{\tau_1 p},$$

где

$$K_p = \frac{R_3}{R_1};\ \ \tau_1 = C_1 R_3.$$

Передаточная функция тиристорного преобразователя:

$$W_{\text{тр}}(p) = \frac{k_{\text{тр}}}{T_{\text{тр}} p + 1}.$$

Постоянная времени тиристорного преобразователя равна: $T_{\text{тр}}$=0,02166. Коэффициент усиления тиристорного преобразователя равен $k_{\text{тр}}$=33,75 [1].

Электрическая постоянная времени двигателя:

$$T_{\text{Э}} = \frac{L_a}{R_a}.$$

Электромеханическая постоянная времени двигателя:

$$T_M = \frac{JR_a}{(C_e \Phi)^2}.$$

Коэффициент передачи двигателя без учета реакции якоря [2]:

$$k_{\text{дв}} = \frac{1}{C_e \Phi} = \frac{1}{1{,}182} = 0{,}846.$$

Задающее напряжение:

$$U_z = k_c w_0,$$

ω_0 – желаемая частота вращения двигателя.

Параметры двигателя приведены в таблице.

Характеристики электромеханического преобразователя

Ra, Ом	La, Гн	$C_e\Phi$	J, Н·м
26	$308 \cdot 10^{-3}$	1,182	$9{,}945 \cdot 10^{-4}$

Получим внешнюю характеристику датчика скорости, сигнал с которого будет приходить на сравнивающее устройство (рис. 4). Рассмотрена

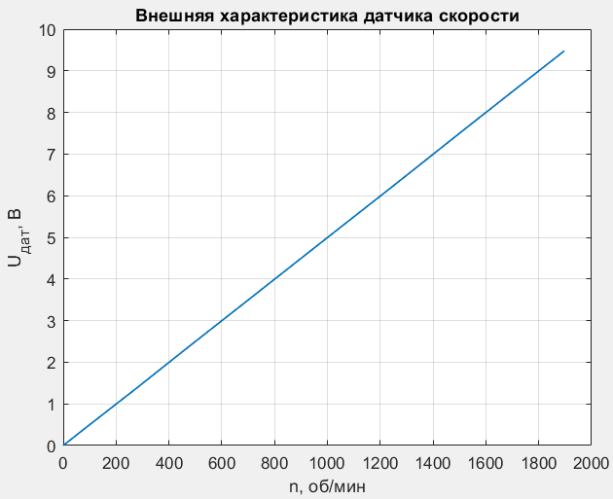


Рис. 4. Внешняя характеристика датчика скорости

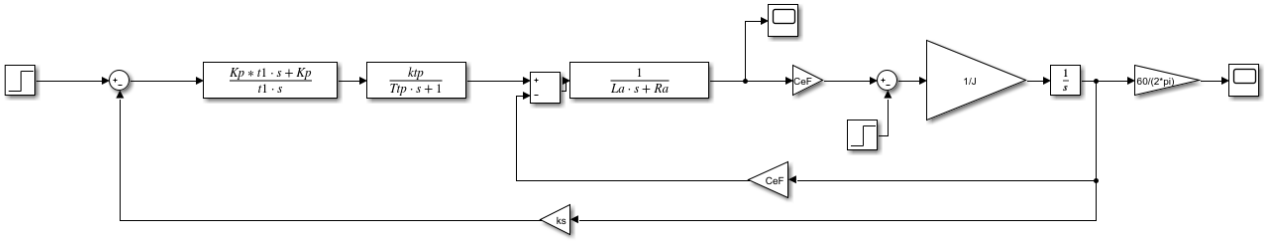


Рис. 5. Структурная схема электропривода

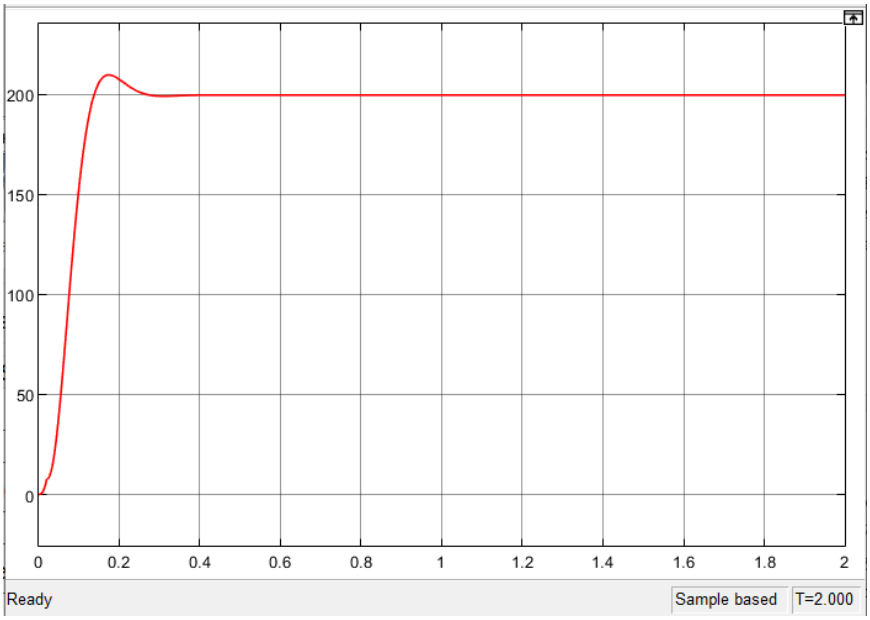


Рис. 6. Переходный процесс по скорости

линейная часть характеристики датчика, в которой он будет выдавать правильные показания. То есть он может корректно выдавать значения только до 2000 об./мин.

С учетом знания всех необходимых передаточных функций можем перейти к составлению модели в среде MatLab Simulink электропривода с обратной связью по скорости (рис. 5).

В данном случае используется ПИ-регулятор по скорости, на который подается сигнал со сравнивающего устройства (сумматора), которое в свою очередь формирует сигнал ошибки для регулятора. На сумматор приходят задающее напряжение, которое пропорционально требуемой скорости вращения и сигнал с тахогенератора, который измеряет обороты двигателя [3].

После регулятора сигнал подается на тиристорный преобразователь, передаточную функцию которого необходимо учитывать вследствие большого влияния на переходный процесс. Далее по схеме уже идет часть, отвечающая за модель двигателя и учитывающая его параметры. Также модель способна учитывать статический момент, который задается с помощью блока *Step*.

Перейдем к анализу результатов моделирования. При задающем напряжении равном 1 В, что соответствует желаемым 200 об./мин имеем переходный процесс по скорости, представленный на рис. 6.

Как видим полученный обороты соответствуют заданному значению напряжения. Присутствует перерегулирование равное ~5 %. Время переходного процесса составляет 0,126 с.

Сравним полученный переходный процесс с реальной системой. В реальности регулятором и сумматором сигналов выступает схема, собранная на операционном усилителе (рис. 7).

С помощью такой схемы можно регулировать пропорциональную (R3) и интегральную (C1) составляющие.

В данной схеме также присутствует возможность ограничения выходного сигнала, что удобно использовать для предотвращения пода-

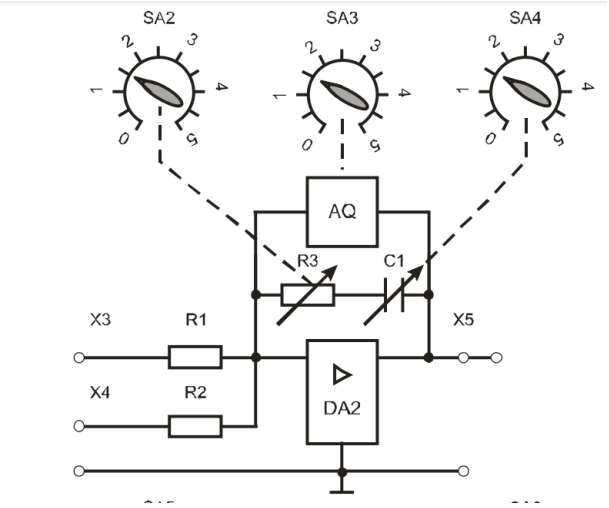


Рис. 7. Структурная схема регулятора на ОУ

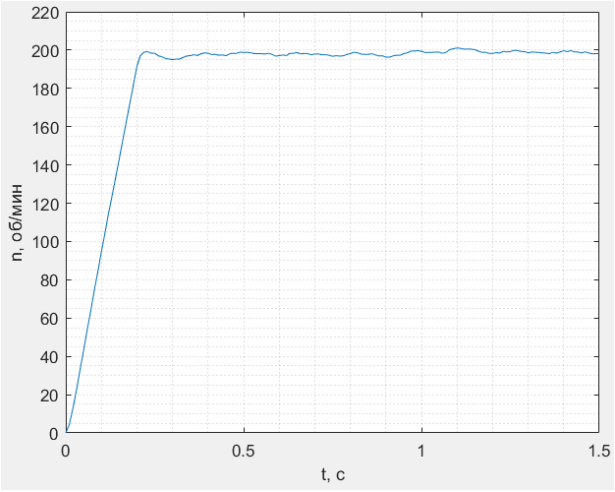


Рис. 8. Переходный процесс по скорости (эксперимент)

чи на контакт управления тиристорным преобразователем напряжения выше разрешенного.

Полученный в результате эксперимента переходный процесс по скорости представлен на рис. 8.

Время переходного процесса по скорости составляет 0,129 с, установившееся значение – 198 об./мин.

Есть небольшие отличия в переходных процессах модели и эксперимента, однако их можно объяснить. Модель является идеализированной, но в реальном оборудовании много влияющих факторов, например, температура под влиянием которой будет меняться сопротивление обмотки якоря.

Перерегулирование в модели может возникать вследствие того, что в модели не учитываются сопротивления проводов и разъемов стенда.

Время переходного процесса имеет незначительное отличие, которое вызвано фильтрацией графика эксперимента, так как присутствовали посторонние шумы.

Получим механическую характеристику электропривода (рис. 9). Оценив данную характеристику, мы сможем увидеть, как обратная связь отрабатывает изменение нагрузки на двигатель и тем самым поддерживает заданные обороты [4].

Получили довольно жесткую механическую характеристику при увеличении нагрузки на двигатель. То есть можно сделать вывод, что обратная связь отрабатывает изменение нагрузки на двигатель.

Заключение

Полученные данные из моделирования в среде MatLab Simulink соответствуют реальному объекту с учетом небольших отклонений.

Электропривод с обратной связью по скорости является прогрессивным и эффективным подходом к управлению движением в современных технических системах.

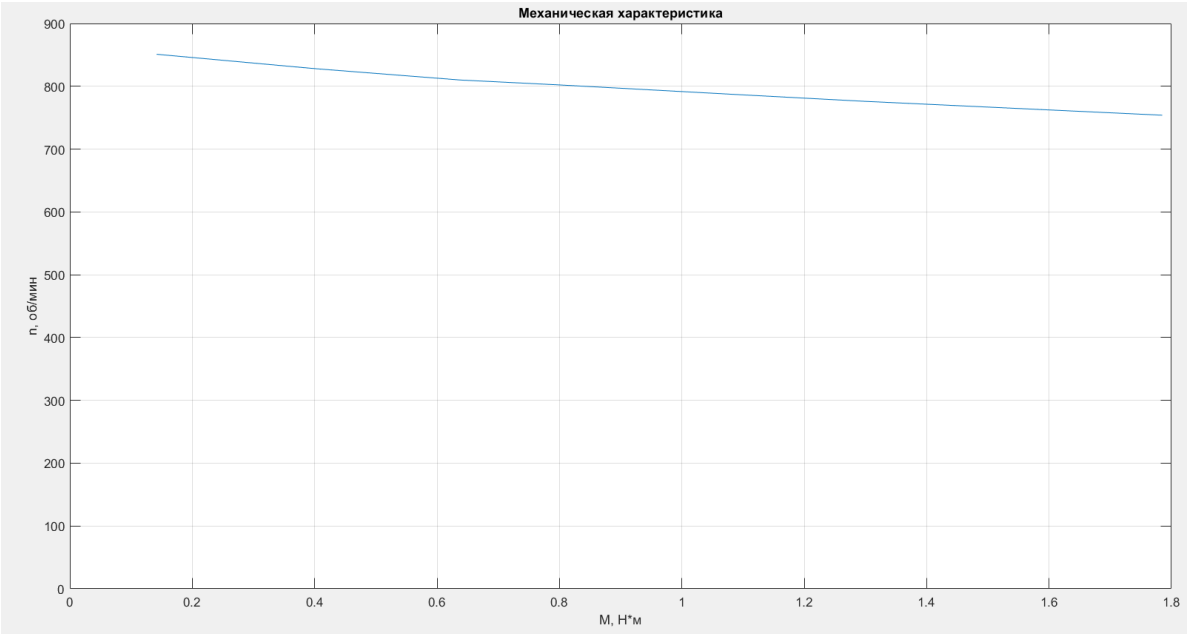


Рис. 9. Механическая характеристика привода

Использование обратной связи по скорости в электроприводах позволяет повысить точность позиционирования и контроля скорости. Это особенно важно в промышленных процессах, где даже небольшие отклонения могут иметь серьезные последствия.

Список источников

1. *Мартынов А. А.* Электрический привод: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2015. 524 с.

2. *Тимофеев С. С.* Учет в математических моделях влияния реакции якоря в двигателе. СПб.: ГУАП, 2023. 9 с.

3. *Бурков А. Ф., Сериков А. В.* Электродвигатели электрических приводов: учеб. пособие для СПО. СПб.: Лань, 2023. 104 с.

4. *Мартынов А. А.* Основы электрического привода: учеб.-метод. пособие: в 2 ч. Ч. 2. СПб.: ГУАП, 2021. 133 с.

УДК 621.341.572 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-276-279**

Н. К. Третьяков*
студент
В. П. Кузьменко*
кандидат технических наук, доцент
О. Я. Солёная*
кандидат технических наук, доцент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ НА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЕ

Проведен анализ силовой части современных импульсных преобразователей частоты. Рассмотрены принципы преобразования и формирования напряжения. Выявлены основные требования, предъявляемые к надежности и качеству преобразователей и их составным частям. Проведен анализ отечественных производителей полупроводниковых и пассивных компонентов. Выявлена возможность проектирования преобразователей частоты средней мощности на отечественной компонентной базе. В исследовании используются методы структурного анализа.
Ключевые слова: *преобразователь частоты, силовая часть, ток, напряжение, выпрямитель, инвертор, звено постоянного тока.*

N. K. Tretyakov*
Student
V. P. Kuzmenko*
PhD, Tech., Associate Professor
O. Ya. Solenaya*
PhD, Tech., Associate Professor
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DESIGN OF FREQUENCY CONVERTERS USING DOMESTIC ELECTRONIC COMPONENTS

The work analyzes the power part of modern pulse frequency converters. The principles of voltage transformation and generation are considered. The basic requirements for the reliability and quality of converters and their components have been identified. An analysis of domestic manufacturers of semiconductor and passive components was carried out. The possibility of designing medium-power frequency converters on a domestic component base has been identified. The study uses structural analysis methods.
Keywords: *frequency converter, power section, current, voltage, rectifier, inverter, DC transformer.*

Введение

В современной автоматизированной промышленности и производстве преобразователи частоты (ПЧ) играют ключевую роль в рамках выполнения сложных технических задач, где необходимо точное управления электромеханическими комплексами и системами. ПЧ позволяют выполнять регулировку различных типов электрических машин [1] согласно заданным параметрам, варьирующимся от специфики задачи. Стоит отметить, что существуют различные методы управления электродвигателями посредством частотных преобразователей, например, векторное и скалярное, но данное отличие заключается в реализации системы управления и подключения различных типов датчиков. Основная задача ПЧ – это формирования амплитуды и частоты напряжения, подаваемого на электродвигатель, отличного от стандартного сетевого [2] посредствам широтно-импульсной модуляции (ШИМ, англ. pulse-width modulation (PWM)) [3].

Таким образом, вне зависимости от типа и реализации алгоритма управления, ПЧ имеют общую структуру силовой части и способ преобразования напряжения.

В работе рассмотрены ключевые принципы и технические аспекты проектирования

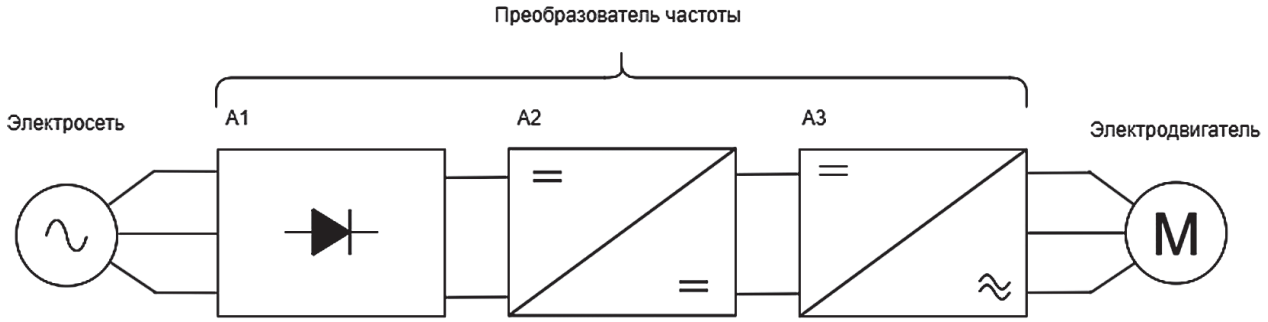


Рис. 1. Структурная схема преобразователя частоты

силовой части частотных преобразователей, начиная с их основ и завершая современными тенденциями в разработке отечественных устройств.

Принцип работы

ПЧ работают по принципу двойного преобразованя – переменное входное синусоидальное напряжение в постоянное, а далее, с заданными параметрами частоты и амплитуды, обратно в переменное [4]. Стоит отметить, что при применении различных синус-фильтров, выходное напряжение имеет форму синусоиды, без – квадратные импульсы с требуемым среднеквадратичным значением напряжения.

Обобщенная структура ПЧ представленная на рис. 1, где А1 – выпрямитель; А2 – звено постоянного тока (ЗПТ); А3 – инвертор.

Согласно основам электротехники, выпрямители по типу управления делятся на три основные группы: неуправляемые – диодные; управляемые – тиристорные или транзисторные; полууправляемые – диодно-тиристорные. При применении в трехфазных сетях переменного тока с изолированной нейтралью выпрямители ПЧ проектируются по схеме А. Н. Ларионова (трехфазный выпрямитель) (рис. 2) [5].

Выпрямитель необходим для преобразования (выпрямления) напряжения в однополярное для дальнейшего сглаживания пульсаций конденсаторным ЗПТ и последующего преобразования.

Для вторичного преобразования постоянного тока в переменный применяются трехфазные инверторы, построенные в основном на IGBT транзисторах, работающих по принципу ШИМ и соединенных попарно последовательно по схеме «полумост» (рис. 3).

Таким образом, обобщенная структура ПЧ состоит из трех составных частей, выполняющих двойное преобразование тока: переменный в постоянный, со сглаживанием пульсации напряжения на ЗПТ и обратно (рис. 4) [6].

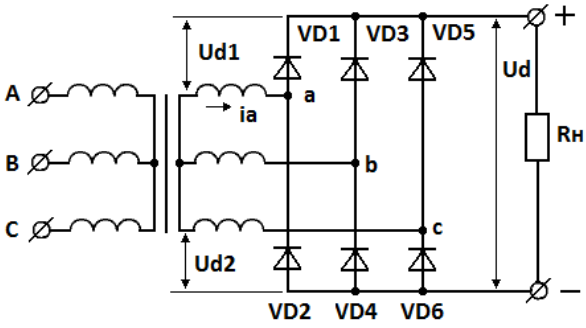


Рис. 2. Трехфазная мостовая схема направляемого выпрямителя (схема Ларионова)

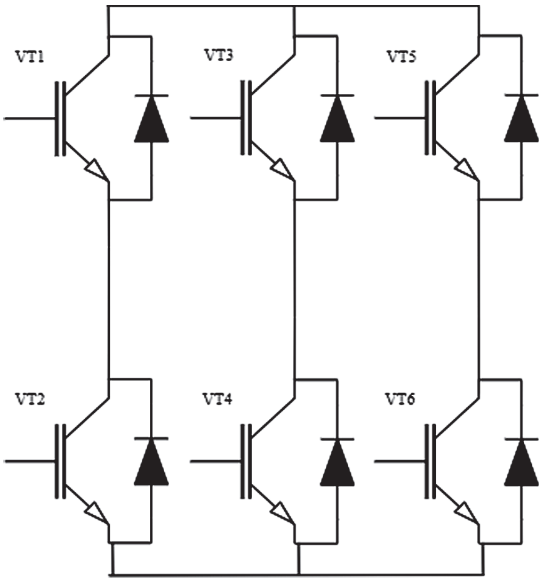


Рис. 3. Схема трехфазного моста, построенного на IGBT-транзисторах

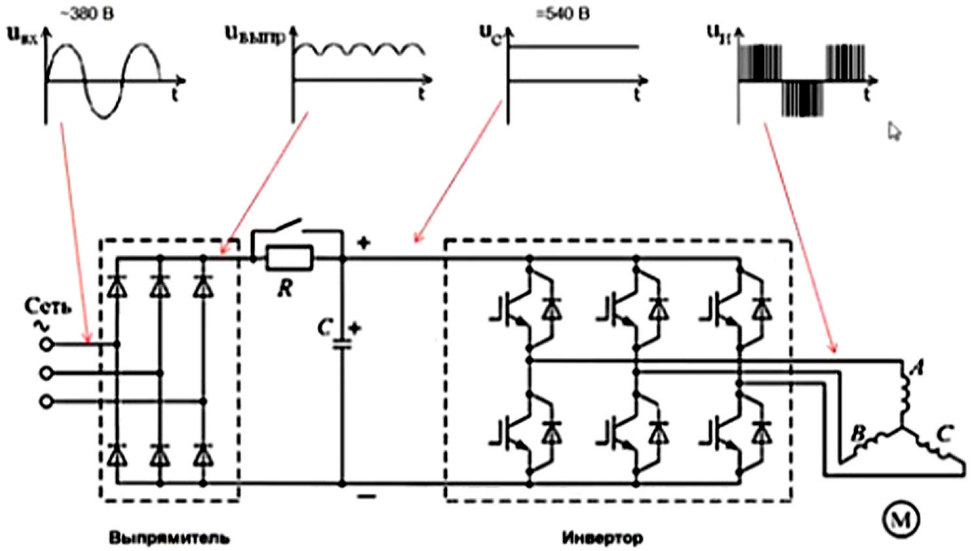


Рис. 4. Принцип работы ПЧ

Исполнительные элементы

Основными исполнительными элементами силовой части ПЧ являются цепи плавного заряда звена постоянного и управления транзисторами. Цепи плавного заряда конденсаторного ЗПТ необходимы для ограничения зарядного тока емкости, до минимального уровня выпрямленного однополярного напряжения, так как в первоначальный момент включения конденсатор разряжен и ток, по сути, ограничен только внутренним сопротивлением конденсатора, которое имеет значение, измеряемое мОм [7]. Реализация плавного заряда заключается в протекании тока по цепям со встроенным сопротивлением и дальнейшей коммутации в цепи в обход резистора. Наибольшее распространение получила две вариации вышеописанной схемы – реле заряда или применение тиристорного выпрямителя в его различных исполнениях.

Цепи управления транзисторов имеют более сложную структуру и функционал. Общая структура управления транзисторами инвертора ПЧ представлена на рис. 5.

Для безопасного управления транзисторами необходимо формировать определенные уровни напряжения, для IGBT – +15 В на открытие и –8В на закрытие, а также обеспечивать номинальный ток, определяемый затворным рези-

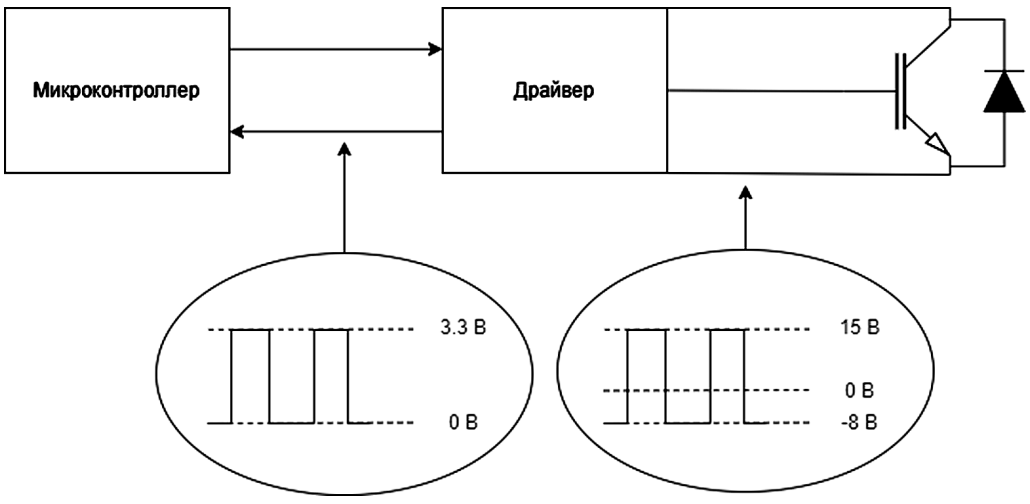


Рис. 5. Упрощенная структурная схема системы управления IGBT-транзистором с указанными уровнями напряжения

стором, влияющий на динамические характеристики [8]. Стоит отметить, что более продвинутые драйверы транзисторов имеют функции защиты ключа, контроля собственных параметров и выдачу различных сигналов ошибки.

Проектирование на отечественной электронной компонентной базе

Электронные компоненты силовой части ПЧ делятся на активные и пассивные. К активным относятся полупроводниковые компоненты – диоды, транзисторы, тиристоры и т. д., к пассивным – резисторы, конденсаторы, моточные и коммутационные элементы.

При рассмотрении отечественного рынка полупроводников компонентов категории качества ОТК наибольшее распространение получила продукция производителей АО «Ангстрем»; АО «Протон-Электротекс»; АО «ЭЛЕКТРУМ АВ», выпускающих широкий спектр силовых компонентов в стандартном формфакторе и внутренней схеме соединения.

К производителям пассивных компонентов, в рамках проектированию ПЧ, следует отнести ООО «Нюкон Энерджи», АО «НИИ „Гириконд“», АО «Элеконд», которые выпускают различные типы конденсаторов.

С токи зрения проектирования системы управления IGBT и MOSFET транзисторами АО «ЭЛЕКТРУМ АВ» предлагает наиболее обширный выбор отечественных драйверов с встроенной системой защиты и диагностики, но на сегодняшний момент собственная продукция также представлена у АО «Ангстрем» и АО «Протон-Электротекс».

Заключение

Преобразователь частоты является технически сложным устройством, при проектировании которого необходимо учитывать специфику задачи, а также режимы и параметры эксплуатации. Рассмотренная обобщенная структура и принцип работы как составных частей, так и самого ПЧ позволяет утверждать о возможности практической реализации силовой части на отечественной ЭКБ. Дальнейшие исследования посвящены рассмотрению возможности практической реализации системы управления на отечественном ЭКБ, а также проведению сравнительного анализа параметров конечного продукта с импортными аналогами.

Список источников

1. *Матвеев А. В.* Классификация электрических машин для изобретателей и искусственного интеллекта // Электричество. – 2022. № 6. С. 4–19. Doi: 10.24160/0013-5380-2022-6-4-19.

2. *Volskiy S. I., Skorokhod Yu. Yu., Echkilev N.* Selecting the switching frequency of the 6500 V IGBT high voltage DC converter // Elektrichestvo. 2021. № 8. P. 21–27. Doi: 10.24160/0013-5380-2021-8-21-27.

3. *Полющенков И. С.* Применение модельно-ориентированного программирования для управления силовыми транзисторными преобразователями электроприводов // Электротехника. 2023. № 1. С. 27–34. Doi: 10.53891/00135860_2023_01_27.

4. ГОСТ 29322-2014 (IEC 60038:2009). Напряжения стандартные. М.: Стандартинформ, 2015. 3 с.

5. *Коробков Д. В.* Система «Трехфазный МЭГ – управляемый мостовой выпрямитель» с дополнительным дросселем в нейтрали: режимы работы и условия их существования // Вестн. Перм. нац. исследов. политехн. ун-та. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 32. С. 160–182.

6. Устройство и принцип работы преобразователя частоты. URL: https://www.vesper.ru/presscenter/articles/ustroystvo-i-printsip-raboty-preobrazovatelya-chastoty/ (дата обращения: 06.12.2023).

7. Aluminum electrolytic capacitors. URL: https://static.chipdip.ru/lib/642/DOC005642536.pdf (дата обращения: 07.12.2023).

8. *Дрексэдж П., Винтрич А., Колпаков А.* Драйвер IGBT: «ядро» или plug-and-play? Базовые принципы и основные схемы // Силовая электроника. 2021. № 4 (91). С. 32–40.

УДК 621.311 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-280-283**

О. Б. Чернышева*
старший преподаватель
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РОЛЬ АКТИВНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Рассмотрены свойства интегрированных интеллектуальных энергетических систем и роль активного потребителя в их эффективном функционировании. Рассмотрена возможность применения теории игр для определения оптимальной стратегии поведения активного потребителя в энергетической системе.
Ключевые слова: *электроэнергетика, интегрированные интеллектуальные энергетические системы, активный потребитель, теория игр, стратегии активного потребителя.*

O. B. Chernysheva*
Senior Lecturer
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE ROLE OF AN ACTIVE CONSUMER IN AN INTELLIGENT ENERGY SYSTEM

The properties of integrated intelligent energy systems and the role of an active consumer in their effective functioning are considered. The possibility of applying game theory to determine the optimal strategy for the behavior of an active consumer in the energy system is considered.
Keywords: *electric power industry, integrated intelligent energy systems, active consumer, game theory, active consumer strategies.*

В электроэнергетическом комплексе России традиционно преобладала централизованная система электроснабжения, в которой энергия, генерируемая на различных электростанциях, передавалась большому количеству пользователей и все решения по производству, передаче и распределению энергии принимались централизованными управляющими органами. Однако такая система имеет ряд недостатков, включая высокие затраты на транспортировку энергии, низкую устойчивость к авариям и проблемы, связанные с экологической обстановкой. Аварии на объектах электроэнергетики нередко приводят к неудовлетворительному качеству электроэнергии, а повышение тарифов на электроэнергию только усиливают конфликт между производителями и потребителями, не решая, при этом, основных проблем.

Возрастающая роль распределенной генерации энергии приводит к обострению конфликта между крупными генерирующими компаниями, т.к. их общие интересы пересекаются на одном рынке – потребительском. Широкое применение инструментов цифровой трансформации, таких как интернет вещей, большие данные и искусственный интеллект, позволит значительно сгладить возникающие конфликтные ситуации. Следует заметить, что энергетика одна из немногих отраслей промышленности, в которой переход к цифровой трансформации принят далеко не всеми игроками рынка. Связано это с несколькими причинами. Во-первых, отсутствие практического опыта по внедрению информационных технологий и огромная доля изношенного и морально устаревшего оборудования электростанций и распределительных сетей. Согласно аналитическому отчету, износ энергетического оборудования на электростанциях всех типов составляет 56 %, а по оборудованию электрических и тепловых сетей достигает 80 % [1].

Во-вторых, несогласованность в действиях между ключевыми игроками энергетического рынка. Проекты, реализуемые компаниями, используют цифровые технологии локального характера и не учитывают общих интересов рынка [2].

В-третьих, внедрение новых технологий подразумевает масштабное инвестирование в отрасль, однако, не все готовы к таким шагам и занимают, как правило, выжидающую позицию.

Решение перечисленных проблем возможно при переходе к полноценному контролю и ана-

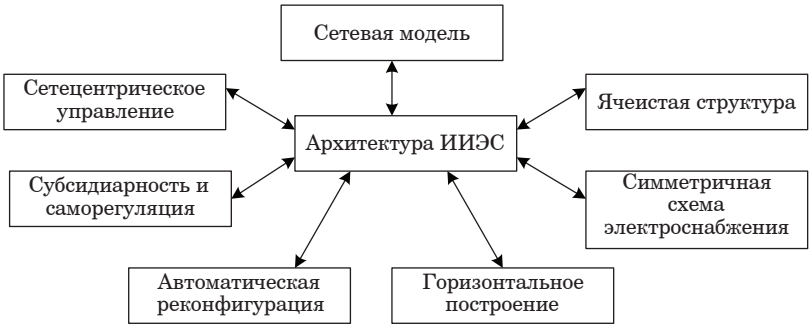


Рис. 1. Технологическая структура ИИЭС

лизу всей энергетической отрасли в сочетании с прогнозированием и управлением. Именно такой подход предусматривает цифровая трансформация отрасли, направленная на повышение эффективности работы систем, создание новых моделей бизнеса, более устойчивых и экологически безопасных интегрированных систем.

Идея создания интегрированных интеллектуальных энергетических систем (ИИЭС) возникла в начале 2000-х гг., целью которой была оптимизация режимов работы отрасли и повышение ее эффективности. Современные ИИЭС объединяют в себе различные технологии, такие как энергоэффективные системы, системы управления нагрузкой, системы хранения энергии, системы управления микрогридами и т. д.

Использование ИИЭС позволяет сократить затраты на энергию и повысить энергоэффективность, что приводит к экономии денежных средств; они позволяют быстро реагировать на изменения в потреблении и производстве энергии, что повышает гибкость и надежность системы. ИИЭС также обладают высокой степенью автоматизации и управляемости, что упрощает процессы управления и контроля. Кроме этого, они являются инновационными технологиями, которые способствуют развитию экономики и повышению конкурентоспособности предприятий.

Принципы построения ИИЭС направлены на создание самоорганизующихся взаимосвязанных энергетических систем для обеспечения качественного соответствия требованиям потребителей (рис. 1).

Целевым ориентиром интеграции энергетических систем является обеспечение активного участия потребителя, без которого невозможна эффективная и устойчивая работа рынка электроэнергии.

Активный потребитель – это потребитель, который не только потребляет электроэнергию, но и принимает активное участие в управлении своими энергетическими потребностями. При использовании технологий умного дома, участия в программе управления нагрузкой, контроля качества электроэнергии и интеллектуализации энергопотребления, активный потребитель может оптимизировать свое потребление энергии, что способствует улучшению энергоэффективности. Установка собственных систем генерации энергии, таких как солнечные панели или ветрогенераторы, поможет ему стать независимым от централизованных источников энергии и обеспечить себе надежные и экологически чистые источники электроэнергии и ее хранения.

Модель поведения активного потребителя может быть описана математическими методами, в частности, при помощи теории игр. Теория игр – это научная дисциплина, которая изучает принципы принятия решений в ситуациях, где результат зависит от действий нескольких участников. Основная идея теории игр заключается в том, что игра является моделью реальной жизни. В игре участники принимают решения на основе своих интересов и целей, и каждое действие влияет на исход игры. Таким образом, теория игр позволяет анализировать различные стратегии поведения и предсказывать их результаты [3].

Она может быть использована и в энергетике для определения поведения потребителя на рынке электроэнергии.

Одним из ключевых понятий теории игр является арбитражная схема Нэша, суть которой заключается в том, что каждый участник выбирает свою оптимальную стратегию, исходя из предположения, что другой участник также выберет свою оптимальную стратегию. Затем каждый участник проверяет, является ли его выбор оптимальным, учитывая выбор другого участника. Если оба участника выбрали оптимальные стратегии, то такое состояние является равновесием по Нэшу.

Кроме этого, арбитражная схема Нэша позволяет оптимизировать принятие решений в условиях конкуренции, а применительно к активному потребителю – оптимизировать потребление энергии и принимать решения о том, когда и у кого приобретать электроэнергию. Это особенно актуально в условиях динамично меняющихся цен на энергию и возможности выбора поставщика. Варианты возможных стратегий потребителя:

1) проведение анализа текущих цен на электроэнергию у различных поставщиков, оценка своих потребностей и возможность использования собственных источников;

2) на основе анализа рынка определить оптимальное время и способ приобретения электроэнергии у различных поставщиков и выбор наиболее выгодных условий;

3) в случае наличия у потребителя собственных источников энергии – разработать стратегию максимально эффективного их использования;

Для получения оптимального решения активный потребитель должен постоянно отслеживать изменения на рынке электроэнергии и вносить корректировки в свою стратегию в соответствии с новыми условиями. Также он может проводить переговоры с различными поставщиками электроэнергии для получения более выгодных условий поставки.

Учитывая, что теория игр предполагает наличие минимум двух игроков, то вторым игроком может выступать генерирующая или энергосбытовая компания, в зависимости от того, у кого потребитель приобретает электроэнергию. Возможные стратегии второго игрока:

1) для обеспечения стабильного и надежного предложения электроэнергии возможно развитие разнообразных (например, возобновляемых) источники энергии;

2) для привлечения активных потребителей и снижения спроса в пиковые часы компании могут применять гибкую систему ценообразования;

3) Для уменьшения потребления электроэнергии и повышения конкурентоспособности компании могут инвестировать разработку и внедрение энергоэффективных технологий.

Целевая функция Нэша для активного потребителя на рынке электроэнергии может быть сформулирована следующим образом: максимизировать экономическую выгоду от приобретения электроэнергии путем минимизации затрат на ее приобретение у различных поставщиков и (или) использования собственных источников энергии, при условии обеспечения необходимого уровня энергетической потребности.

На практике часто решения приходится искать в условиях неопределенности, основной причиной которых является недостаток исходной информации. Рассмотрим, каким образом может быть организована оптимизационная задача с применением элементов теории игр. Предположим, что есть два игрока: 1-й игрок – потребитель, который принимает решения о приобретении электроэнергии в соответствии со своими требованиями; 2-й игрок – генерирующая компания, т. е. некоторые перспективные мощности потребителей электроэнергии. В общем виде платежная матрица, элементы которой представляют собой затраты игроков игры, показана в таблице.

Платежная матрица

	y_1	y_2	…	y_j	…	y_m
x_1	A_{11}	A_{12}	…	A_{1j}	…	A_{1m}
x_2	A_{21}	A_{22}		A_{2j}		A_{2m}
…	…	…	…		…	
x_i	A_{i1}	A_{i2}		A_{ij}		A_{im}
…			…		…	
x_n	A_{n1}	A_{n2}		A_{nj}		A_{nm}

Строки матрицы соответствуют решениям, которые принимает 1-й игрок, столбцы – ходы (решения), предпринятые 2-м игроком. Оптимальное решение находится на основание анализа платежной матрицы [4].

Основные стратегии для принятия решения.

1. Минимум средних затрат – для каждого хода (решения) 1-го игрока определяются средние затраты по всем возможным ходам 2-го игрока:

$$A_{\text{ср}i} = \left(\sum_{j=1}^{m} A_{ij} \right) / m.$$

Оптимальным выбирается решение, соответствующее минимуму средних затрат:

$$x_i \to \min A_{\text{ср}i}, \; i = 1,...n.$$

Недостатком данной стратегии является предположение о том, что все ходы 2-го игрока равновероятны, а в реальных условиях это бывает крайне редко.

2. Минимаксная стратегия – на каждый x_i ход 1-го игрока 2-й игрок отвечает ходом (решением), соответствующим максимальным затратам:

$$A_{\max i} = \max A_{ij}, \; j = 1,...m.$$

Оптимальное решение – минимум из всех максимальных затрат:

$$x_i \to \min \max A_{ij}, i = 1,...n, j = 1,...m.$$

3. Стратегия Гурвица – учитывает как самые неблагоприятные, так и благоприятные ситуации, а оптимальное решение определяется как:

$$x_i \to \min_i (k \max_j A_{ij} + (1-k) \min_j A_{ij}),$$
$$i = 1,...n, j = 1,...m,$$

где k и $(1–k)$ – весовые коэффициенты, определяющие решения в стратегии. Значения этих коэффициентов определяются в зависимости от конкретной ситуации с учетом реальности.

Таким образом, применение теории игр в энергетике может помочь в оптимизации распределения нагрузки, определении оптимальной цены на энергию и оптимальном уровне инвестиций. Однако необходимо учитывать сложности моделирования и анализа игры, а также динамические изменения в энергетической системе. Поэтому для достижения наилучших результатов, может потребоваться комбинирование теории игр с другими методами и алгоритмами.

Список источников

1. Оценка экономической эффективности использования скважинных нефтедобывающих электротехнических комплексов в республике Коми URL: Оценка экономической эффективности использования скважинных нефтедобывающих электротехнических комплексов в республике Коми (e-rej.ru) (дата обращения: 03.12.2023).

2. *Дербенева А. А.* Цифровая трансформация энергетических компаний: механизмы и инструменты // CHRONOS': мультидисциплинарные науки. 2022. Т. 6, № 5 (67). С. 52–55.

3. *Вартанов С. А., Ивин Е. А.* Прикладная теория игр для экономистов. Вологда: ВолНЦ РАН, 2020. 283 с.

4. *Костин В. Н.* Оптимизационные задачи электроэнергетики: учеб. пособие. СПб.: СЗТУ, 2003. 120 с.

УДК 004.9 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-284-289**

О. Б. Чернышева*
старший преподаватель
И. С. Лебедев*
студент
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ И СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕЙ ПЛАТФОРМЫ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

Рассматривается исследование магнитных и электрических характеристик левитирующей платформы на постоянных магнитах и геометрические характеристики магнитного поля исследуемого левитрона путем моделирования их в программе Ansys Maxwell.
Ключевые слова: *постоянные магниты, левитация, магнит-платформа.*

O. B. Chernysheva*
Senior Lecturer
I. S. Lebedev*
Student
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INVESTIGATION OF MAGNETIC AND POWER CHARACTERISTICS OF A MAGNETOLEVITATING PERMANENT MAGNET PLATFORM

The article examines the study of the magnetic and electrical characteristics of a levitating platform on permanent magnets and the geometric characteristics of the magnetic field of the levitron under study by modeling them in the Ansys Maxwell program.
Keywords: *permanent magnets, levitation, magnet platform.*

Конец XX в. подарил человечеству такое соединение, как неодим-железо-бор, из которого производят мощные редкоземельные магниты, которые при своих массогабаритных характеристиках имеют магнитную индукцию высокой мощности. Современные редкоземельные магниты (РЗМ), такие как неодимовые, являются практически вечными, при правильных условиях использования они теряют лишь 1 % своей магнитной силы за сто лет, благодаря этому они обрели высокий спрос в области машиностроения, электроприборостроения и электродвигателестроения [1]. Благодаря буму цен на Китайские РЗМ в 2010 г., внутри нашей страны начали появляться собственные предприятия по производству РЗМ, поэтому нынешнее состояние химической, редкоземельной промышленности позволяет создавать магниты и магнитные системы под любые задачи и любые температурные или внешние условия в требуемых объемах, что, в свою очередь, открывает возможность создания энергоэффективных устройств, принцип работы которых основан на преодоление земного притяжения путем взаимодействия постоянных магнитов [2].

В настоящее время существуют следующие типы магнитных левитационных устройств:

1) устройства, использующие электромагниты;

2) устройства, использующие принцип сверхпроводимости;

3) устройства, использующие постоянные магниты.

Рассмотрим устройства, использующие постоянные магниты.

Магнитная левитация на постоянных магнитах энергоэффективнее, проще и дешевле остальных, но при этом она является более узконаправленной, ее сложно интегрировать в системы движения транспорта, ее стабильность сильно зависит от положения магнитов, формирующих основное поле.

Существуют два основных типа левитронов на постоянных магнитах, оба в своей основе используют эффект потенциальной ямы, но имеют разные способы удержания платформы

Рис. 1. Упрощенная схема гироскопического левитрона

в зоне с низкой потенциальной энергией: один работает на гироскопическом эффекте (рис. 1), а другой использует систему корректирующих электромагнитов, которые управляются системой автоматического управления (САУ) [3].

Гироскопический левитрон имеет максимально примитивную конструкцию: два постоянных магнита, один формирует магнитное поле, второй имеет меньший размер и форму волчка. Волчок раскручивается и устанавливается над магнитом, формирующем основное магнитное поле на заранее рассчитанной высоте. Пока происходит вращение волчка и на него действует гироскопическая сила, магниты направлены друг к другу одноименными полюсами и находятся в балансе, как только обороты волчка снизятся до такой величины, что сила, переворачивающая волчок станет больше силы гироскопического эффекта, магниты выйдут из баланса и левитация прекратится. На длительность левитации влияют такие факторы как трение волчка о воздух, его масса, симметричность магнитных полей, прецессия, положение магнита, формирующего основное поле относительно оси вращения земли и форма магнитного поля земли.

Практическое исследование проводилось на левитирующей платформе, которая использует один магнит-платформу диаметром 40 мм и толщиной 5 мм, 24 кольцевых магнита с внешним диаметром 12 мм и внутренним 4 мм, толщиной 3,5 мм, разделенных на 8 групп, которые формируют основное магнитное поле и 4 соленоида под управлением САУ. Неодимовые магниты, используемые в системе, имеют марку N52, их характеристики приведены в табл. 1

Цепь САУ представляет собой два Н-моста, каждый из которых управляется своим дифференциальным усилителем. На каждый из усилителей приходит сигнал от присвоенного ему датчика Холла. Если представить, что через

Таблица 1

Характеристики материала используемых магнитов

Класс магнита	Остаточная магнитная индукция, мТл	Коэрцитивная сила, кА/м	Магнитная энергия, кДж/м^3	Рабочая температура, °С
N52	1430–1480	876	398–422	80

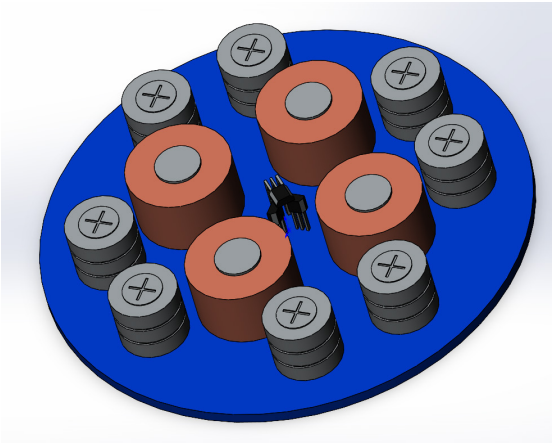


Рис. 2. 3D-модель платы корректирующих катушек

центр левитрона проходит ось *Z*, а на верхней плоскости магнитов, формирующих магнитное поле, располагается плоскость *XY*, то каждый из датчиков будет отвечать за свое направление оси: один – за ось *X*, второй – за ось *Y*.

На 3D-модели платы корректирующих катушек (рис. 2) в центре платы расположены три датчика Холла: загнутый отвечает за включение САУ при появлении над ним магнита-платформы (схема его подключения показана на рис. 3), два других – за контроль отклонения магнита-платформы от центра потенциальной ямы.

Принцип работы схемы САУ показан на рис. 4 и заключается в следующем. Один из усилителей LM324, например, U1D – принимает сигнал датчика J1, два других – U1B и U1C служат драйверами Н-моста, образованного транзисторами Q1, Q2, Q3, Q4. Пока поплавок находится в центре потенциальной ямы, усилитель U1D должен быть в балансе, и оба плеча Н-моста закрыты. Как только платформа смещается в сторону одного из соленоидов, изменяется сигнал с датчика J1, одна из половин Н-моста открывается, и соленоиды индуцируют противоположные магнитные поля. Та катушка, которая ближе к платформе, должна ее отталкивать. а которая дальше – притягивать. В результате, платформа возвращается в потенциальную яму.

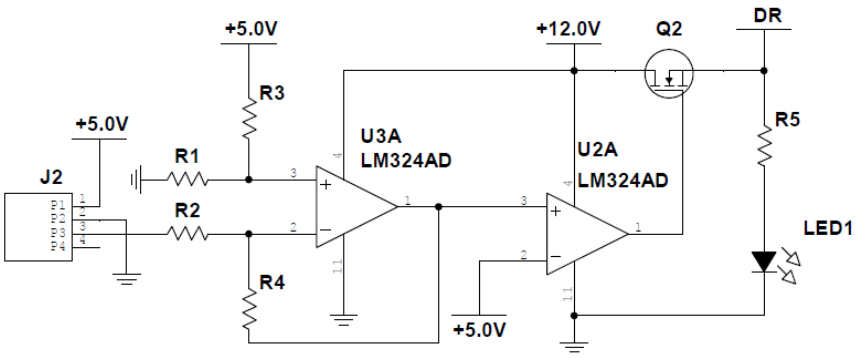


Рис. 3. Схема узла, включающего цепь САУ при появлении магнитного поля магнита-платформы

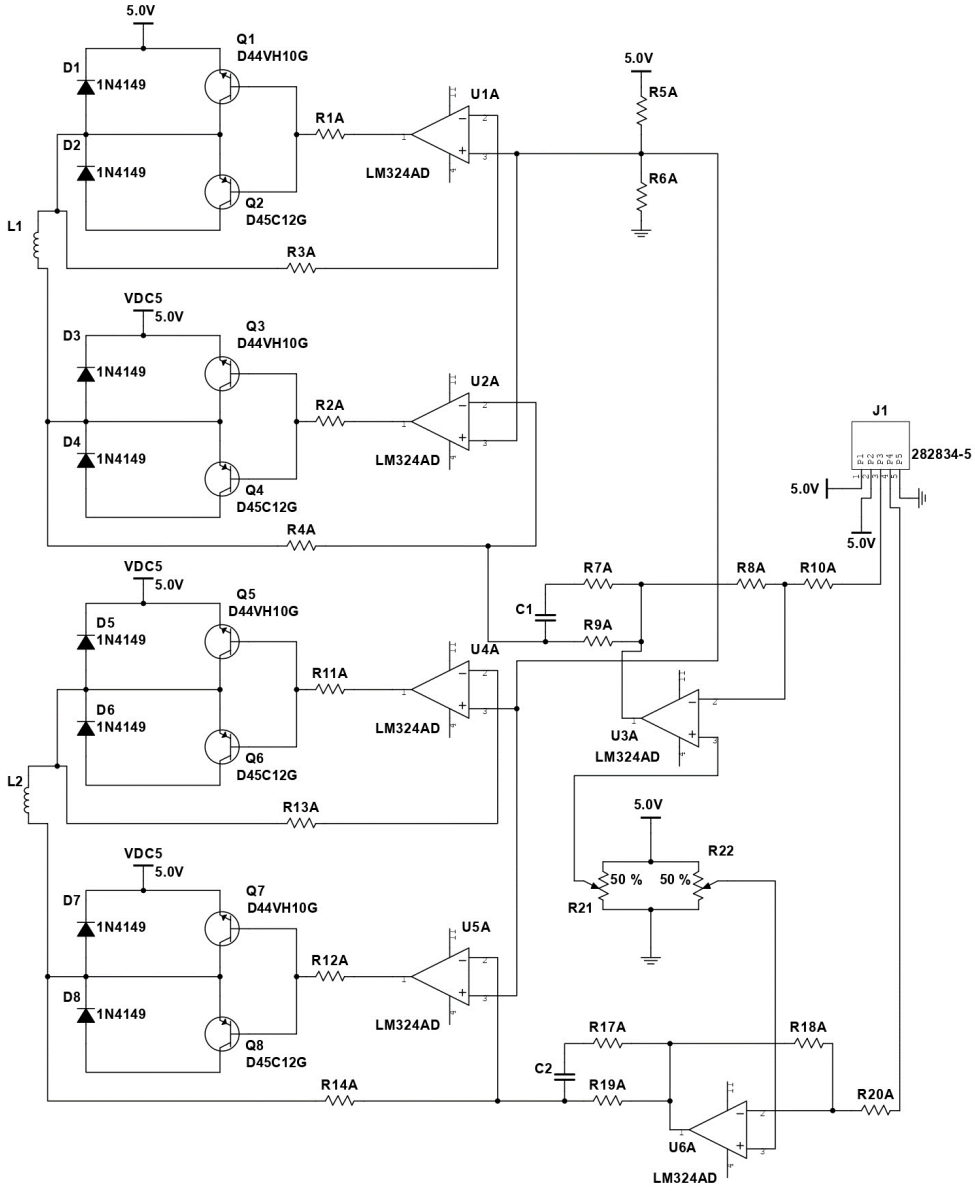


Рис. 4. Схема цепи управления корректирующих катушек

Если платформа возвратится в центр потенциальной ямы со слишком большой силой, будет открыто другое плечо Н-моста, полярность питания пары соленоидов изменится, и платформа опять пойдет к центру. Это будет продолжаться до тех пор, пока платформа четко не займет центральное положение. Такая ситуация произойдет только и только в том случае, если чувствительность датчиков правильно настроена при помощи двух переменных многооборотных резисторов RP1 и RP2. В противном случае, возможны два исхода [4].

1. Платформа изначально не сможет правильно занять свое место, из-за того, что катушки будут ее уводить из центра потенциальной ямы.

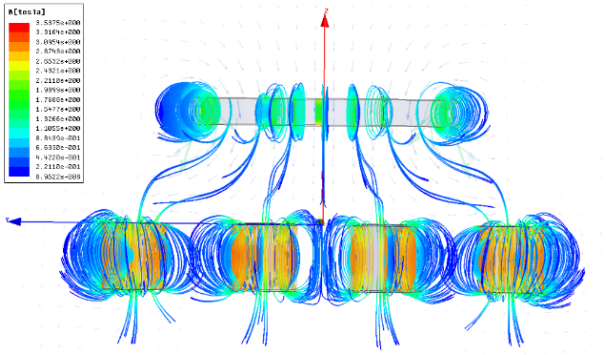


Рис. 5. Форма линий магнитного поля

2. Платформа займет свое место, но начнет раскачиваться с постепенно нарастающей амплитудой что в конце концов приведет к выходу системы из баланса и падению платформы.

В процессе проведения исследований рассматриваемой системы были сняты энергетические показатели САУ. Пиковые значения тока при корректировке платформы достигают 1 А, а напряжения – 1,7 В, в балансе ток падает до 20–30 мА, а напряжение – до 0,2 В. Суммарная мощность, потребляемая в балансе, равна 0,024 Вт, мощность в моменты корректировки 1,7 Вт.

Поскольку визуализация магнитных линий является весьма нетривиальной задачей, классические методы практической демонстрации формы магнитного поля в случае с левитроном очень сложно реализуемы, поэтому было принято решение создать магнитную модель системы в программе Ansys Maxwell. В виду отсутствия во встроенной библиотеке Ansys Maxwell такого материала как неодим-железо-бор марки N52, было принято решение о создании собственного материала.

Результаты моделирования на высоте реального зависания представлены на рис. 5; 6.

На рис. 6 показано, что, согласно цветовым маркерам, вектора, расположенные на верхней поверхности платформы, равны 0,422 Тл, на нижней поверхности платформы – 0,2211 Тл.

На разных высотах левитации были сняты показания воздействия сил на магнит-платформу (табл. 2).

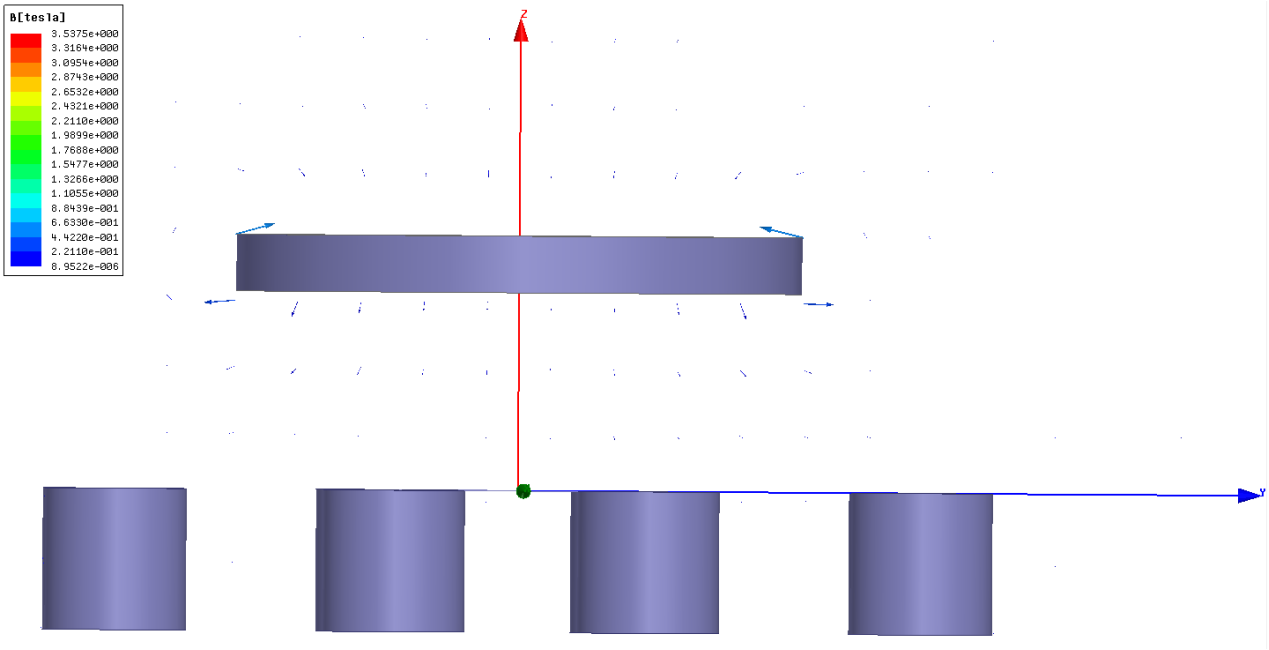


Рис. 6. Направление векторов силы магнитного поля

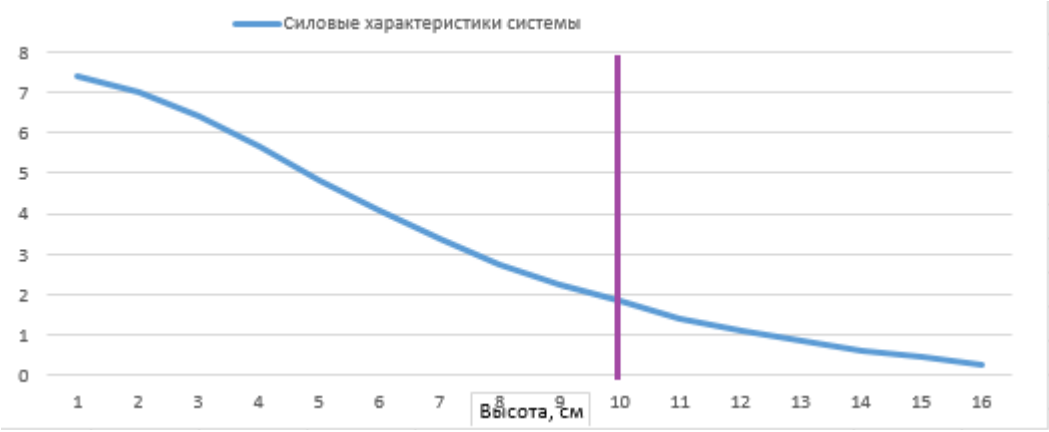


Рис. 7. График зависимости силы, воздействующей на платформу, от высоты левитации

Таблица 2

Данные сил, воздействующих на платформу по оси Z

Номер опыта	Высота левитации, см	Сила, *H*
1	15	0,2491
2	14	0,4472
3	13	0,6338
4	12	0,8727
5	11	1,0950
6	10	1,4309
7	9	1,8327
8	8	2,2482
9	7	2,7567
10	6	3,3781
11	5	4,0926
12	4	4,8424
13	3	5,6606
14	2	6,4157
15	1	6,9845
16	0	7,4039

Анализ зависимости силы, воздействующей на платформу, от высоты левитации (рис. 7) показывает, что по мере уменьшения высоты левитации происходит увеличение силы, отталкивающей магнит-платформу от магнитов. Это дает основание предположить, что система имеет способность самостабилизироваться при воздействии по оси *Z*.

Фиолетовой линией на рис. 7 помечена реальная высота, на которой система выходит из стабильного состояния. Это связано с неравномерным распределением магнитной индукции у магнитов, используемых в исследовании и не идеально настроенной САУ.

Кроме этого, форма поля, задаваемая нижними магнитами, имеет места с очень низкой магнитной индукцией по четырем углам (рис. 8). При снижении платформы ниже критической высоты она «ускользает» в эти «бреши».

Для последующего улучшения конструкции и проведения исследований в этой области был проведен перерасчет конструкции с использованием монолитного кольцевого магнита большого диаметра, у которого не будет «брешей» по углам (вместо 8 групп по три магнита).

Путем подбора и моделирования был определен размер кольцевого магнита, самым подходящим по магнитным и геометрическим параметрам оказался магнит размерами 70 мм – внешний диметр, 60 мм – внутренний и высотой 10 мм. Моделирование его взаимодействия с магнитом-платформой показано на рис. 9.

Важным моментом в выборе нового магнита, формирующего основное магнитное поле, является подбор идентичной с прошлой версией системы высоты баланса. Это нужно для

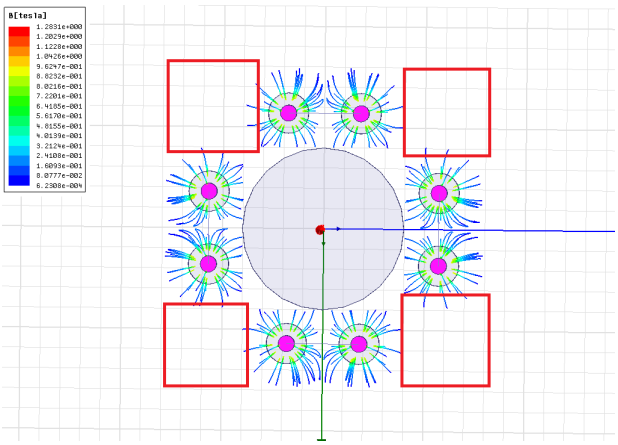


Рис. 8. «Бреши» магнитного поля

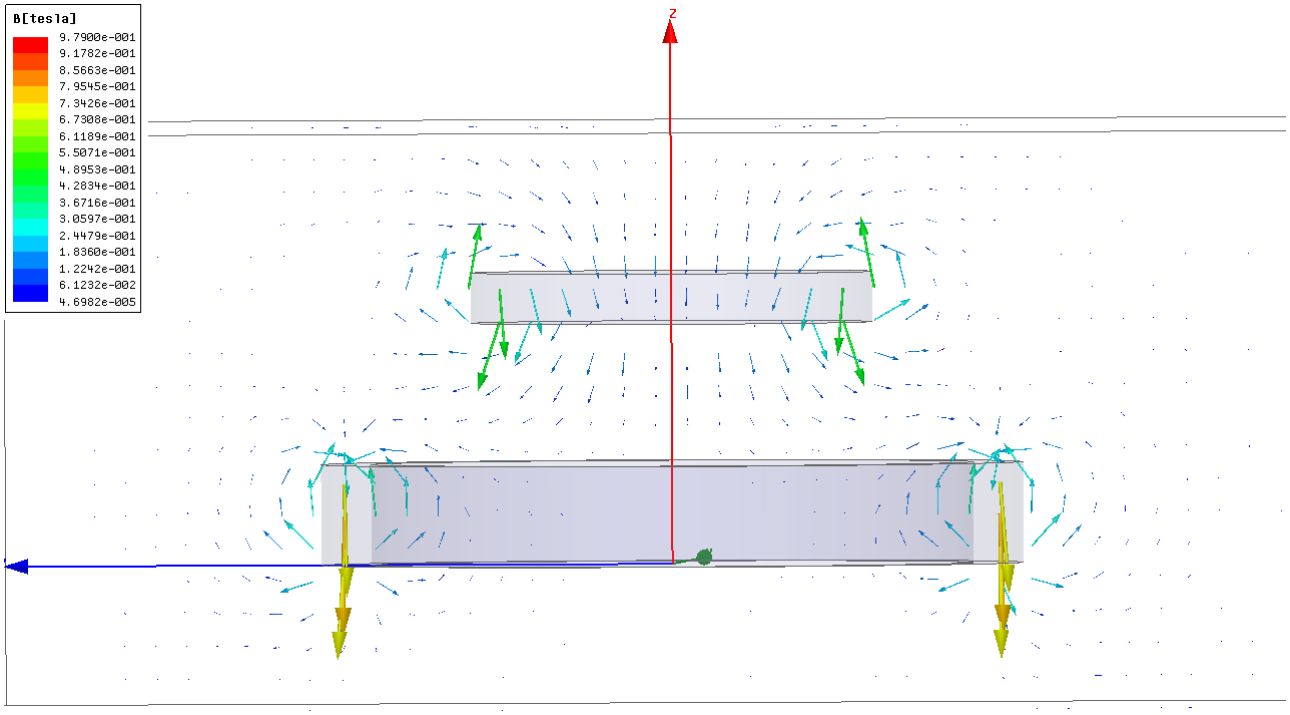


Рис. 9. Взаимодействие кольцевого магнита с магнитом-платформой

того, чтобы не переделывать уже имеющуюся систему катушек корректировки и не потерять управляемость.

Возможной областью применения подобных левитирующих платформ могут быть магнитный подшипники, системы, в которых требуется гашение вибраций или нужен динамически изменяемый при нагрузке воздушный зазор по вертикальной оси между частями оборудования.

Исследования показали, что на данный момент рассмотренная система представляет из себя достаточно энергоэффективную систему, но с точки зрения выдерживаемых нагрузок это лишь интересный образец для исследований темы магнитной левитации, с улучшением формы магнитного поля и САУ. Кроме этого, возможно проведение более серьезных экспериментов с различными нагрузками. Если при сохранении массогабаритных характеристик и неизмененной САУ удастся довести поднимаемую полезную нагрузку до 500 г, то будет смысл в масштабировании системы и улучшении САУ.

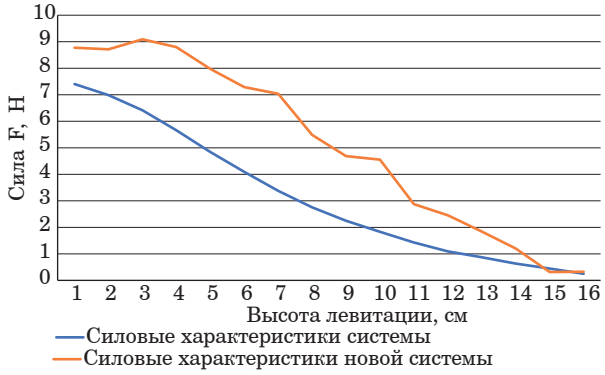


Рис. 10. Сравнение силовых характеристик новой и старой систем

Список источников

1. Использование ферритовых магнитов в синхронных двигателях с постоянными магнитами / А. Р. Сафин, Е. И. Грачева, К. В. Ranjan, Т. И. Петров // Вестн. Казан. гос. энергет. ун-та. 2022. № 1(53). С. 47.

2. Направления развития производственных технологий в области редкоземельных металлов / Д. В. Севастьянов [и др.] // Труды ВИАМ. 2018. № 1 (61). С. 31–32.

3. *Сундуков Е. Ю., Шифрин Б. М., Сундукова В. Е.* Построение многоканальных магнитолевитационных систем // Инновационные транспортные системы и технологии. 2021. № 3. С. 125–126.

4. *Суслопаров Д.* Г Настройка левитрона. URL: https://habr.com/ru/articles/485884 (дата обращения: 12.10.2023).

УДК 681.532.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-290-295**

Д. О. Якимовский*
кандидат технических наук, доцент
Т. Г. Полякова*
кандидат технических наук, доцент
И. Г. Криволапчук*
старший преподаватель
** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРОГРАММНЫЙ ЗАПУСК ГИРОМОТОРА СИЛОВОГО ГИРОСКОПИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Рассмотрены вопросы моделирования процесса разгона гироскопического комплекса. Приведены результаты исследования различных режимов программного запуска 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
I. G. Krivolapchuk*
Senior Lecturer
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SOFTWARE LAUNCH OF THE GYROMOTOR OF THE POWER GYROSCOPIC COMPLEX

The issues of modeling the acceleration process of a gyroscopic complex are considered. The results of a study of various modes of software launch of a power gyroscope are presented.
Keywords: *Power gyroscopic complexes, gyromotor, contactless DC motors, rotor acceleration.*

Силовые гироскопические комплексы (СГК) широко применяются в системах управления ориентацией космических аппаратов (КА). Управляющий момент, прикладываемый к корпусу КА, возникает в результате изменения направления вектора кинетического момента, накопленного инерционным маховиком. Обычно ротор маховика совмещают с ротором электродвигателя, а полученную конструкцию называют гиромотором (ГМ) [1, 2].

В современных ГМ в качестве электродвигателя используют бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) с постоянными магнитами (ПМ) на роторе. Благодаря накопленной энергии ПМ такие ГМ обладают меньшим энергопотреблением, лучшими габаритно-массовыми характеристиками (ГМХ) по сравнению с ближайшими подходящими электроприводами на базе асинхронного или гистерезисного двигателей. Важным свойством БДПТ являются его хорошие регулировочные характеристики.

Известно, что для работы БДПТ необходим датчик положения ротора (ДПР). Применение ДПР в ГМ в виде отдельного конструктивного элемента нежелательно из-за ухудшения ГМХ прибора в целом. В структуре БДПТ есть информация об угловом положении ротора. При вращении ротора с ПМ в обмотках статора наводится ЭДС, амплитуда которой пропорциональна скорости вращения, а фаза – угловому положению ротора в пределах полюсного деления. Для управления БДПТ по сигналам фазных ЭДС нужно решить две задачи: разогнать ротор до определенной скорости, достаточной для измерения фазных ЭДС и организовать измерение фазных ЭДС.

Разгон ротора осуществляется по специальной программе. Программу разгона можно разделить на два участка: приведение ротора

в определенное исходное, нулевое, положение и участок нарастания частоты вращения ротора, электронный блок управления двигателем при этом формирует токи в фазах статора так, чтобы обеспечить равноускоренное вращение магнитного поля. В процессе отработки программы магнитное поле постоянных магнитов ротора синхронно отслеживает магнитное поле статора как в режиме приведения, так и в процессе набора скорости [3, 4].

Движение ротора носит колебательный характер, динамика движения зависит от моментных свойств электрической машины, момента сопротивления подшипниковых опор ротора, от параметров программы разгона и от начальных условий – исходного углового положения ротора и его скорости. Экспериментальная отработка режимов разгона затруднена из-за большого момента инерции ротора – время разгона и выбега могут достигать нескольких десятков минут или часов. В процессе запуска ГМ можно фиксировать только факт достижения ротором заданной скорости. Поэтому подтверждение надежности выбранного режима разгона, как правило, подтверждается математическим моделированием. В [3, 4] приведены методики выбора параметров программы разгона миниатюрного ГМ с газодинамическими опорами ротора. ГМ СКГ отличаются более массивными роторами, в качестве опор используются подшипниковые опоры. Ниже приведены результаты исследования режимов разгона силового гироскопа. В качестве объекта исследования был принят ГМ СГ со следующими характеристиками:

– момент инерции $J = 0{,}05$ кг·м^2;

– коэффициент момента двигателя $K_Д = 0{,}015$ Нм/А;

– скорость в конце программы разгона $\omega_{пр} = 20$ рад/с;

– момент сопротивления $Mc = M_{c0}\mathrm{sign}(\omega)$;

– момент сопротивления покоя $M_{c0} = (0{,}005...0{,}025)$ Нм.

В процессе моделирования БДПТ рассматривается как синхронный электродвигатель, работающий в режиме шагового двигателя. При построении моделей приняты следующие допущения:

– кривая синхронизирующего момента двигателя, возникающего при рассогласовании осей полюсов (векторов магнитных полей) ротора и статора на угол θ, симметрична относительно начала координат и аппроксимирована синусоидой;

– силовые ключи электронного коммутатора – идеальные ключи;

– постоянные времени контура регулирования тока двигателя пренебрежимо малы, переходные процессы в контуре не оказывают влияния на движение ротора.

Математическая модель движения ротора с учетом принятых допущений имеет вид:

$$J\frac{d\omega}{dt} = M_{\max}\sin\theta - M_c(\omega);$$

$$M_{\max} = K_Д i;\ \ \frac{d\varphi}{dt} = \omega;$$

$$\theta = \alpha - \varphi^*;\ \ \varphi^* = \varphi p;\ \ \alpha = F_\alpha(t),$$

где J – момент инерции ротора; M – момент двигателя; $K_Д$; i – коэффициент передачи и ток двигателя; ω – скорость вращения ротора; θ – угол рассогласования между магнитными полями ротора и статора; $\varphi^* = p\varphi$ – угол поворота вектора магнитного поля ротора $\vec{B}$; φ – угол поворота ротора; α – угол поворота вектора магнитного поля статора $\vec{F}$; p – число пар полюсов двигателя; $F(t)$ – функция, описывающая изменение углового положения (вращения) вектора магнитного поля статора во времени; $Mc(\omega)$ – зависимость момента сопротивления в опорах ротора.

Функция $F_\alpha(t)$ задается из условия того, что вектор магнитное поле статора вращается с постоянным ускорением дискретно из некоторого нулевого положения. Дискретное вращение означает то, что вектор магнитодвижущей силы (МДС) $\vec{F}$ поворачивается на определенный угол (угловой шаг) $\alpha_{\min}$. Теоретически угловой шаг $\alpha_{\min}$ может быть сколь угодно малым. При разработке конкретных схем, величину шага выбирают с учетом сложности ее практической реализации.

При программировании движения вектора поля $\vec{F}$ определяется время наступления очередной коммутации (формирование очередного углового шага).

Уравнение равноускоренного вращения вектора статора имеет вид:

$$\alpha = \alpha_0 + \dot{\alpha}t + \frac{Kt^2}{2},$$

где K – скорость нарастания частоты вращения поля статора (крутизна нарастания скорости вращения поля статора). Так как вращение $\vec{F}$ начинается при нулевых начальных условиях ($\alpha_0 = 0$ и $\dot{\alpha} = 0$), а угловое положение вектора может быть только кратным минимальному углу поворота $\alpha = N\alpha_{\min}$, где N – порядковый номер очередного поворота $\vec{F}$, то время очеред-

ного поворота t_N можно определить из выражения:

$$t_N = \sqrt{\frac{2N\alpha_{\min}}{K}},$$

где $\alpha_{\min}$ – минимальный угол поворота в рад.

Время между последовательными угловыми шагами T_N определяется как:

$$T_N = t_N - t_{N-1}.$$

Исходными данными для проектирования программы разгона являются:

– параметры электродвигателя: зависимость момента двигателя от тока, число и схема соединения фаз статора, число пар полюсов;

– закон изменения момента сопротивления в опорах ротора;

– момент инерции ротора;

– скорость вращения в конце программы разгона.

Для оценки надежности прохождения ротором программы разгона следует оценивать максимальный угол рассогласования магнитных полей статора и ротора $\theta_{\max}$ в процессе разгона. Запуск считается надежным, если $\theta_{\max} \le 160$ электрических градусов [4]. Начальное угловое положение ротора задавалось начальным углом рассогласования магнитных полей θ_1. Иллюстрации успешного программного разгона и неудачного приведены на рис. 1; 2 соответственно.

Критерий оптимальности программы разгона является достаточно сложной функцией:

$$\theta_{\max}(I, M_c(\omega), \theta_1, \alpha_{\min}, K) \to \min.$$

В инженерной практике достаточно обеспечить факт успешного прохождения программы из любого произвольного возможного углового положения ротора.

$$\theta_{\max}(I, M_c(\omega), \theta_1, \alpha_{\min}, K) \le 160 \text{ эл. град.}$$

В процессе проектирования программы разгона необходимо определить ток двигателя, темп разгона, угловой шаг $\alpha_{\min}$, которые обеспечивают указанные требования.

Результаты исследования влияния отдельных параметров на динамику разгона приведены в виде зависимостей максимального угла рассогласования полей $\theta_{\max}$ от начального углового положения ротора – начального угла рассогласования θ_1 $\theta_{\max} = f(\theta_1)$ на рис. 3–7.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы.

Увеличение тока двигателя, его электромагнитного момента, приводит к увеличению зоны углов θ_1, обеспечивающих успешное прохождение программы разгона. Однако зависимость нелинейная. Для рассмотренного случая увеличение тока более 3 А нецелесообразно.

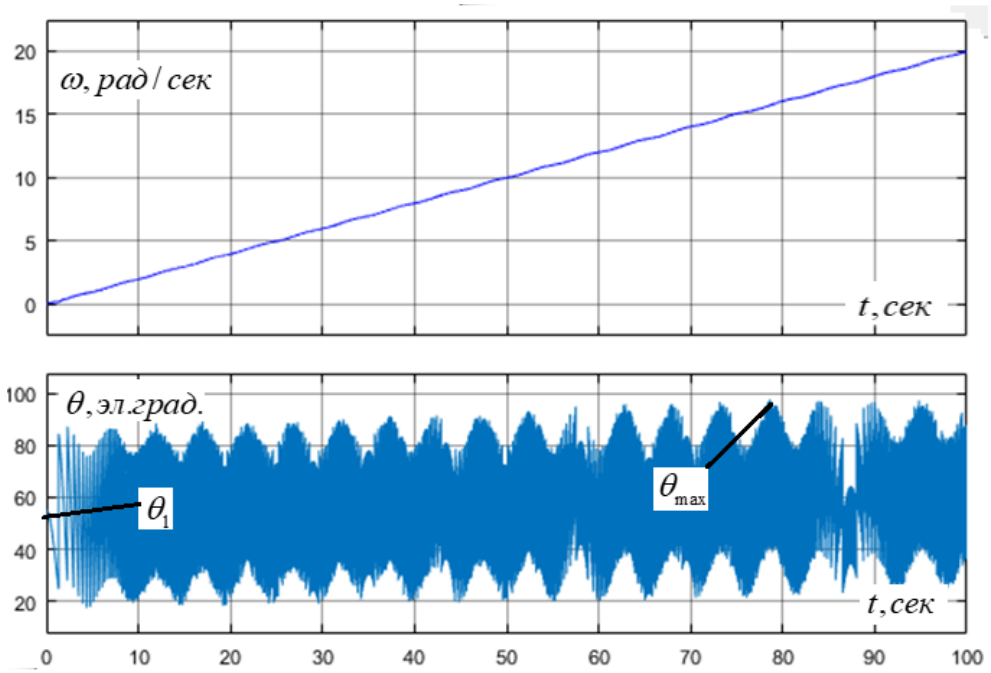


Рис. 1. Иллюстрация успешного прохождения программы разгона. Начальный угол $\theta_1 = 55$ эл. град., *максимальный угол* $\theta_{\max} \le 90$ эл. град.

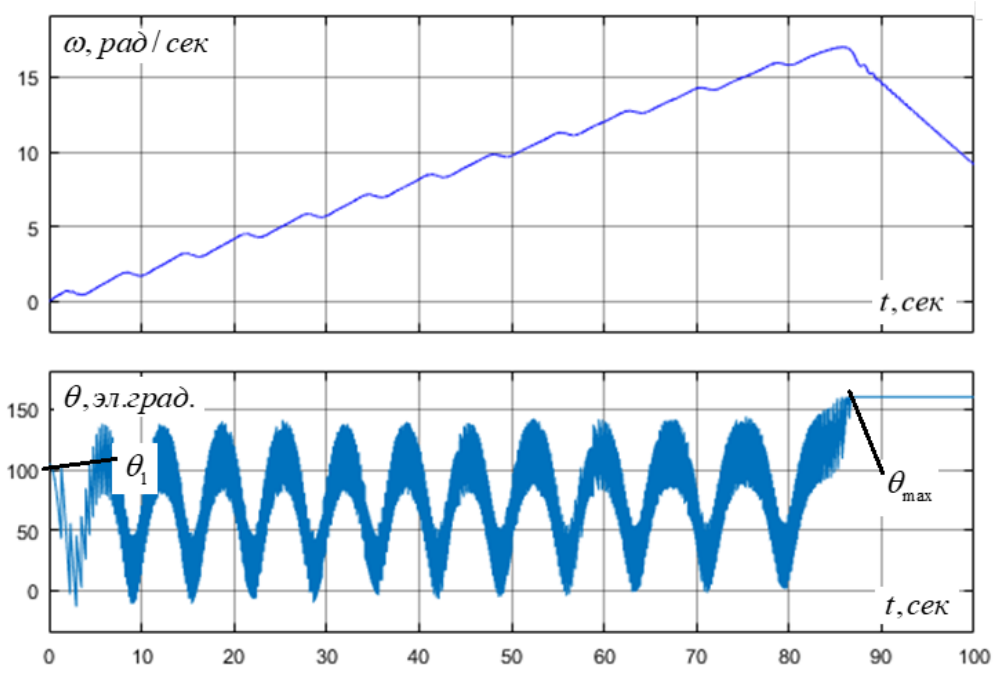


Рис. 2. Иллюстрация неудачного прохождения программы разгона. Начальный угол $\theta_1 = 105$ эл. град., *максимальный угол* $\theta_{max} > 160$ эл. град.

Уменьшение углового шага улучшает условия разгона ротора, но зависимость также нелинейная. Снижение шага менее 30 эл. град. практически не влияет на динамику разгона. Применение шага 60 эл. град. незначительное ухудшает. Применение шага в 60 эл. град. Для трехфазного БДПТ может существенно упростить систему управления электроприводом в целом [5, 6].

Снижение крутизны нарастания скорости программы приводит к улучшению условий разгона. При снижении крутизны менее некоторого значения, можно добиться запускаемости ротора из любого произвольного углового положения. Однако практическая значимость такого режима неочевидна из-за существенного увеличения длительности программы.

Увеличение момента сопротивления ухудшает условия запуска, поэтому поиск оптимальных параметров следует проводить для максимального значения момента сопротивления.

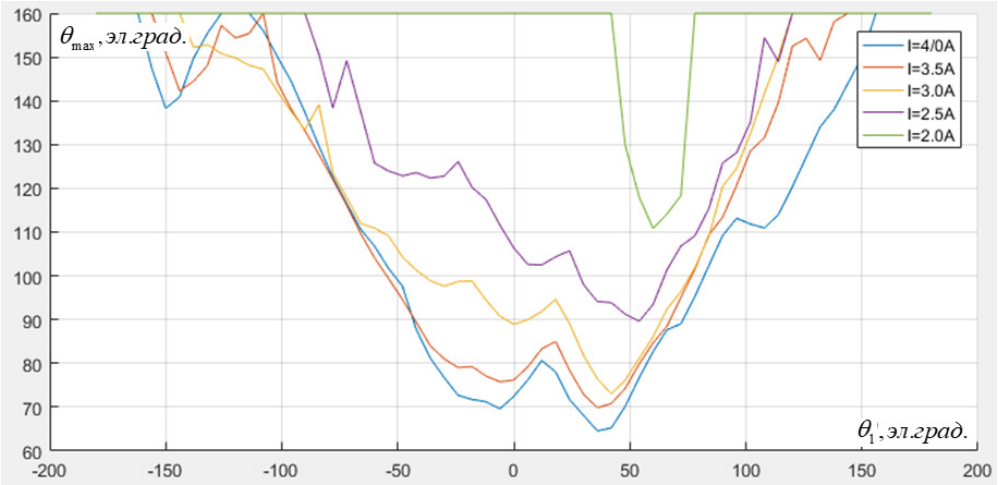


Рис. 3. Величины тока двигателя на зависимость $\theta_{max} = f(\theta_1)$

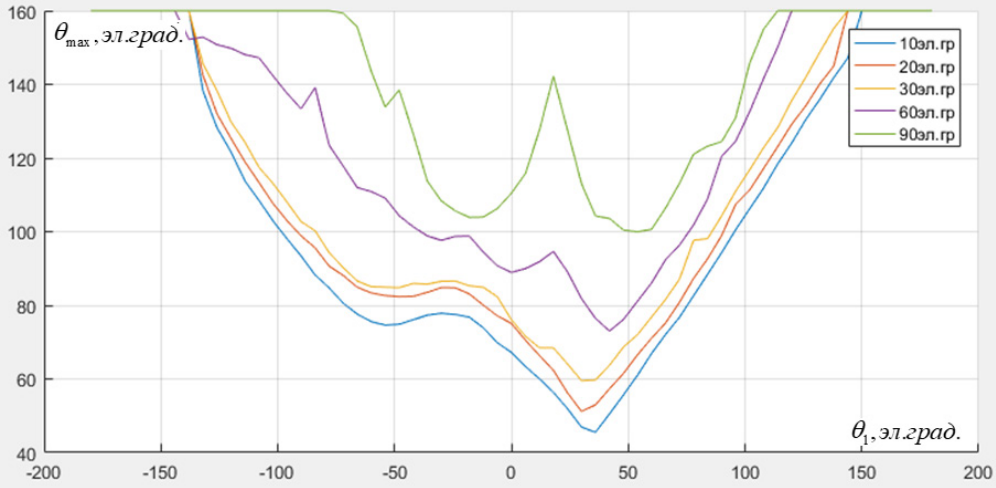


Рис. 4. Влияние величины шага α_{min} *на зависимость* $\theta_{max} = f(\theta_1)$

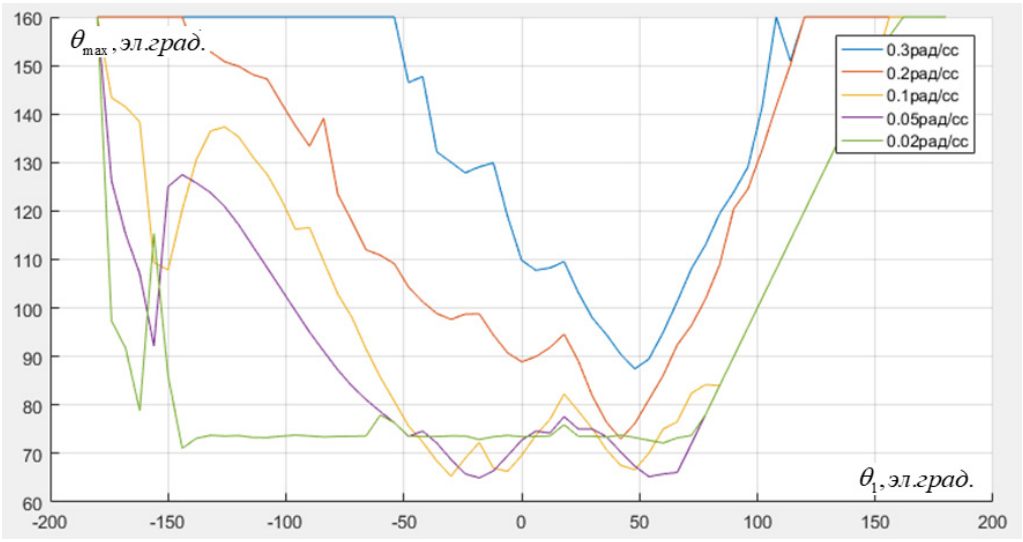


Рис. 5. Влияние темпа нарастания скорости K *на зависимость* $\theta_{max} = f(\theta_1)$

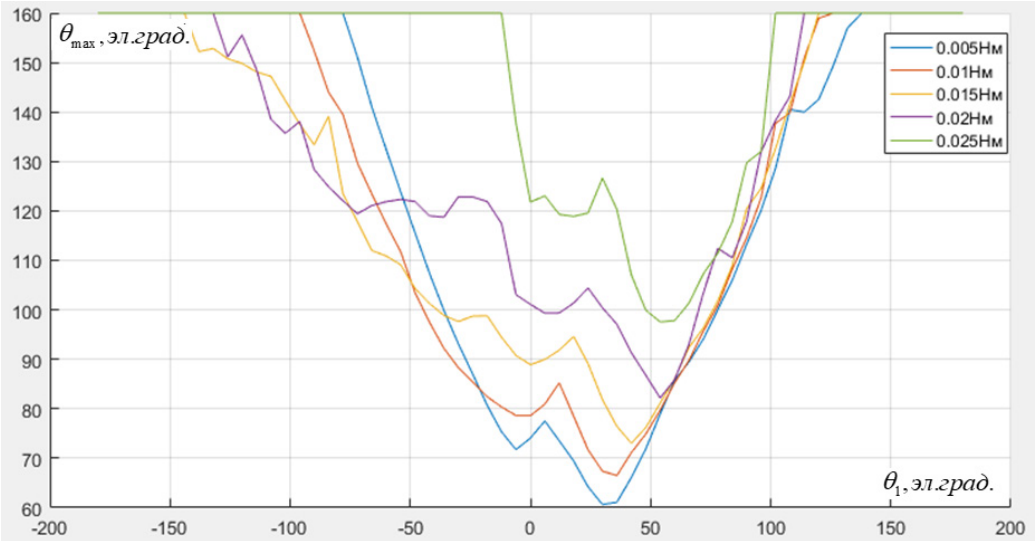


Рис. 6. Влияние момента сопротивления на зависимость $\theta_{max} = f(\theta_1)$

Список источников

1. *Сорокин А. В., Яременко В. В.* История создания силовых гироскопов для систем управления ориентацией космических аппаратов // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30, № 1 (116). С. 84–92.

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 науч. сессии / ГУАП. СПб., 2006. С. 244–246.

6. *Якимовский Д. О., Бураков М. В., Коновалов А. С.* Управление ускорением двигателя-маховика космического аппарата: монография. СПб.: ГУАП, 2018.

ЭЛЕКТРОПРИВОД, ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

УДК 621.3 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-296-300**

Р. Т. Хазиева*
кандидат технических наук, доцент
Н. Р. Кантюков*
аспирант
**Уфимский государственный нефтяной технический университет*

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ Т-ОБРАЗНОГО ФИЛЬТРА В MATLAB SIMULINK

Рассматривается принцип работы однозвенного Т-образного фильтра низких частот на основе катушки и конденсатора. Исходя из теоретических заключений, сигнал на входе фильтра имеет синусоиду неоднозначной формы. Благодаря наличию в схеме катушки, которая при увеличении частоты входного сигнала повышает свое индуктивное сопротивление, а сопротивление конденсатора стремится к нулю, на выходе фильтра получаем «гладкую» форму сигнала.
Ключевые слова: *катушка, конденсатор, фильтр низких частот, сигнал, частота, синусоида.*

R. T. Khazieva*
PhD, Tech., Associate Professor
N. R. Kantyukov*
PhD Student
** Ufa State Petroleum Technical University*

DEVELOPMENT OF A VIRTUAL LABORATORY WORK FOR THE STUDY OF A T-SHAPED FILTER IN THE MATLAB SIMULINK

The paper considers the principle of operation of a single-link low-pass filter of type T, based on a coil and a capacitor. Based on theoretical conclusions, the signal at the filter input has a sinusoid of a non-unambiguous shape. Due to the presence of a coil in the circuit, which increases its inductive resistance as the input frequency increases, and the resistance of the capacitor tends to zero, we get a «smooth» waveform at the filter output.
Keywords: *coil, capacitor, low-pass filter, signal, frequency, sine wave.*

В данной работе проводится анализ работы фильтра низких частот (ФНЧ). Основной задачей является получение результатов компьютерного моделирования и их анализ.

В среде MatLab Simulink была собрана и проанализирована работа ФНЧ, которая относится к типу двухзвенных Т-образных фильтров. Работа данных фильтров базируется на электрических свойствах скорости изменения тока через катушку и определяется индуктивностью катушки, и, соответственно, накопления электрического заряда конденсатором, что, в свою очередь, обуславливается емкостью конденсатора [1]. Для корректной работы фильтра были использованы катушка индуктивности, конденсатор и нагрузка в виде резистора. Источником выпрямляемого сигнала являлся генератор импульсных сигналов. Для регистрации результатов использовался осциллограф (рис. 1).

В литературе приводится схема фильтра низких частот (рис. 2) [2]. Следуя источнику, был смоделирован анализируемый объект.

Были выбраны следующие параметры используемых элементов. Для генератора импульсов: напряжение – 220 В с частотой в 50 Гц; катушка индуктивности: индуктивность – 50 мГн; конденсатор: емкость – 500 мкФ; нагрузка с сопротивлением 9,68 Ом (рис. 3).

По результатам исследования была получена следующая осциллограмма (рис. 4).

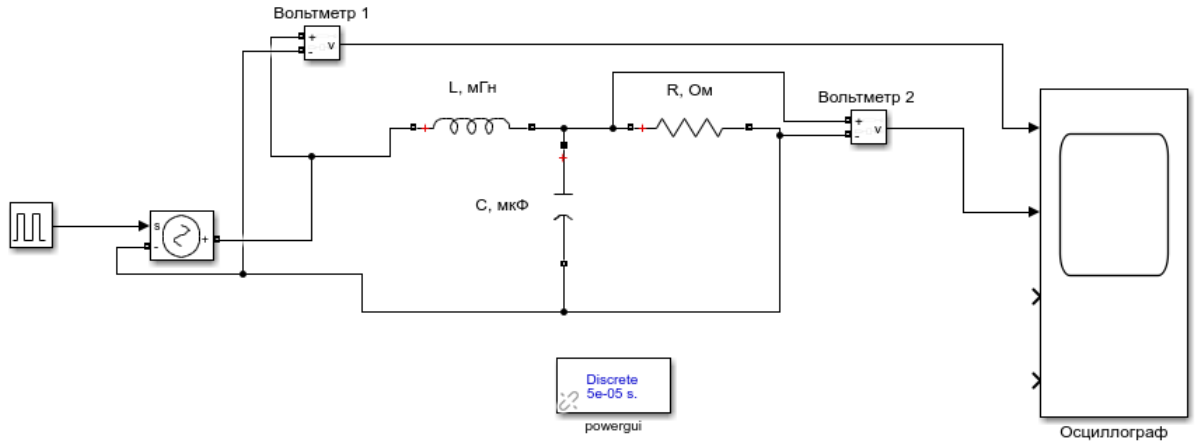


Рис. 1. Фильтр низких частот

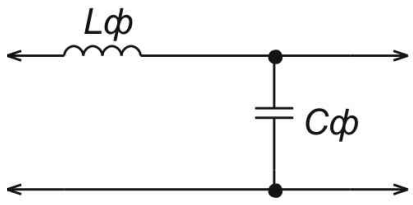


Рис. 2. Схема фильтра низких частот

Проанализировав полученные данные, можно сделать следующие выводы. В период до 0,02 с наблюдается неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), что обусловлено переходным процессом включения фильтра, в следствии чего мы наблюдаем скачок с нуля до 140 В, и далее напряжение принимает номинальные значения моделируемого фильтра, т. е. проходит в полосе пропускания [3].

Расчет характеристик фильтра. Коэффициент передачи моделируемого фильтра равен:

$$A_0 = \frac{U_{вых}}{U_{вх}};$$

$$A_0 = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{125}{220} = 0{,}56.$$

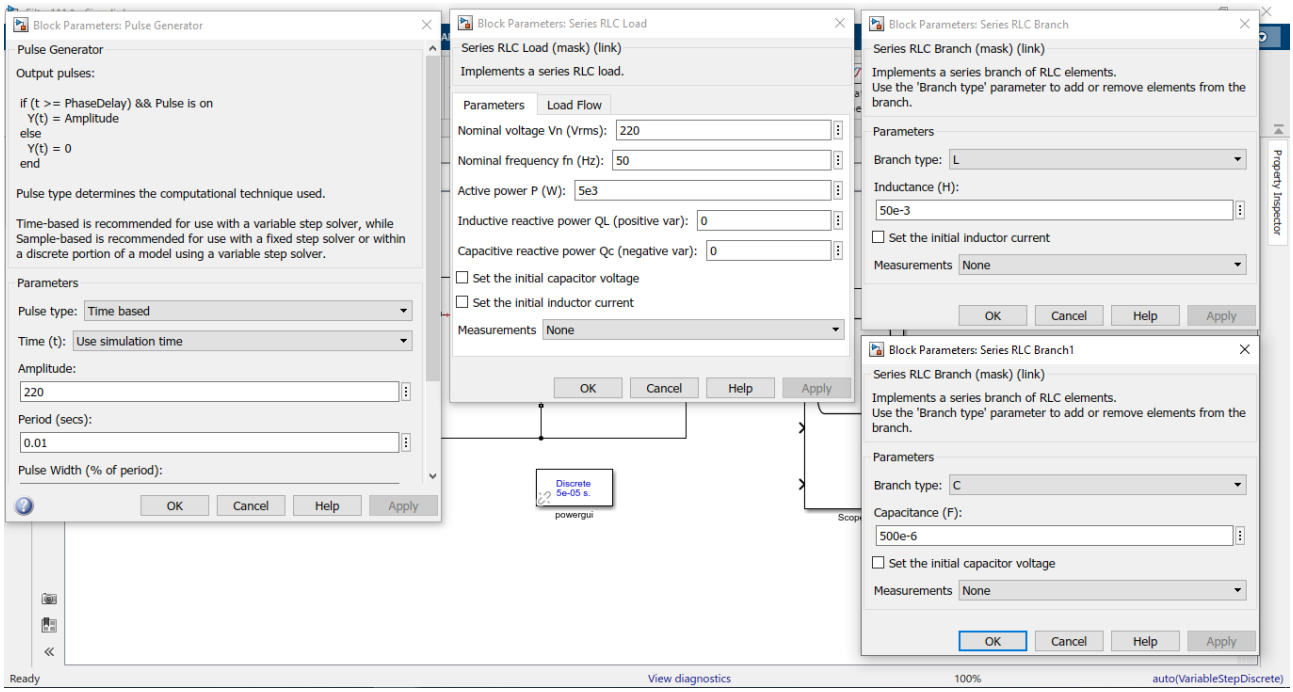


Рис. 3. Исходные данные элементов фильтра

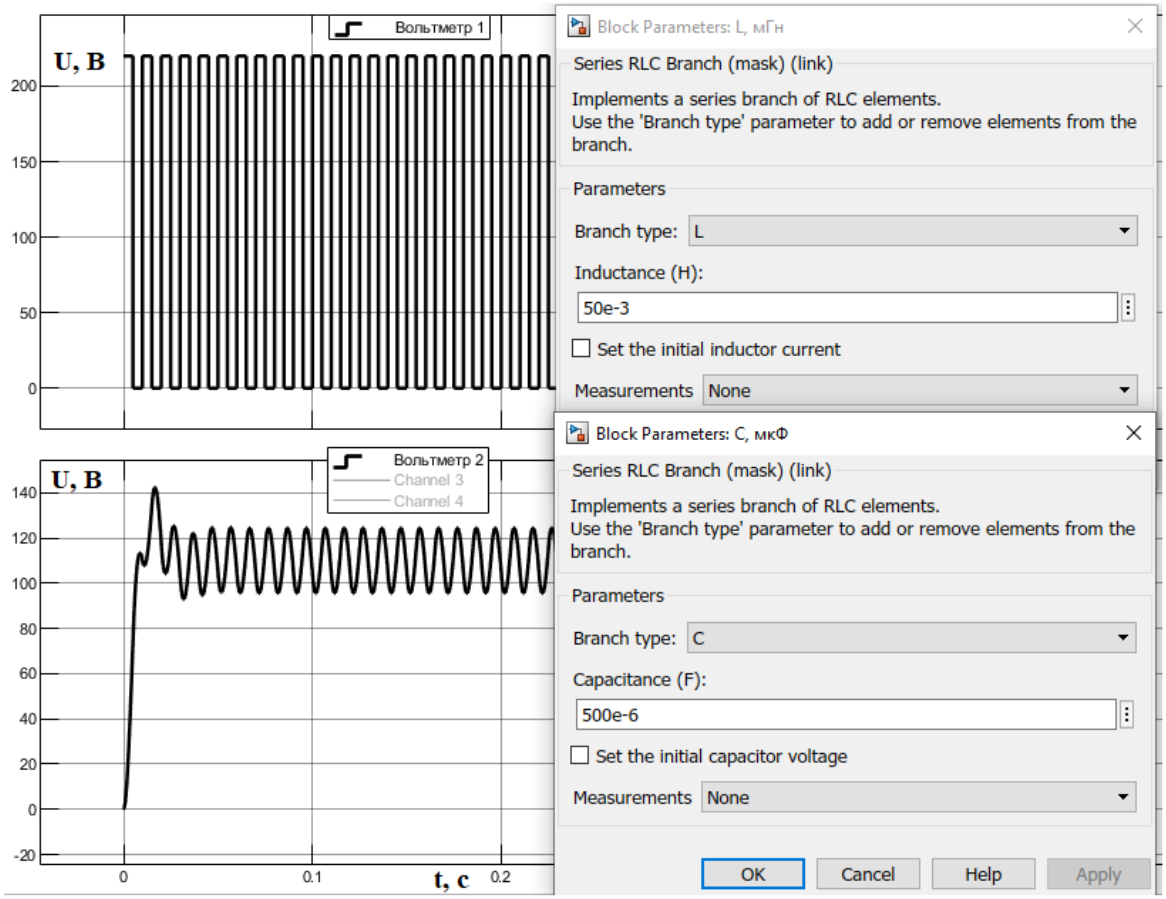


Рис. 4. Результат осциллограммы

Частота среза:

$$W_c = 2\pi f_c,$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f \cdot C_f}} = 31{,}85\,\text{Гц},$$

$$W_c = 200\,\text{рад/с}.$$

При изменении параметров катушки индуктивности и емкости конденсатора меняется и сама синусоида. При возрастании частоты входного сигнала внутренне индуктивное сопротивление катушки растет, а емкостное сопротивление конденсатора – падает. сопротивление конденсатора уменьшается $(\frac{1}{WC}) \to 0$ при увеличении частоты входного сигнала [4]. Таким образом, выходное напряжение на конденсаторе стремится к нулю, что приводит к подавлению высокочастотного сигнала. В обратном случае, частоты сигнала низкие, то низкочастотный сигнал проходит через фильтр с малым затуханием. При этом, простейшие схемы ФНЧ однозвенного типа на основе катушки и конденсатора могут применяться для регулирования частотных характеристик электрических сигналов [5]. При уменьшении индуктивности синусоида приобретает явно не идеальную форму. В значениях около 100 В форма волны искажается. Также меняется амплитуда сигнала, она увеличивается до 340 В (рис. 5).

При увеличении емкости конденсатора наблюдается следующая картина. Напряжение принимает более выравненный синусоидальный сигнал. С более низкой полосой пропускания и меньшей амплитудой [6, 7]. Также присутствует неравномерность АЧХ в период переходного процесса (рис. 6).

Моделирование выполнялось в среде Matlab, результаты которого показали, что в схеме фильтра низких частот катушка и конденсатор помогают сгладить исходный сигнал, достигающегося за счет использования индуктивного и емкостного элемента [7, 8].

Исследования выполнены на средства гранта Стипендии Президента Российской Федерации в 2022–2024 гг. для молодых ученых и

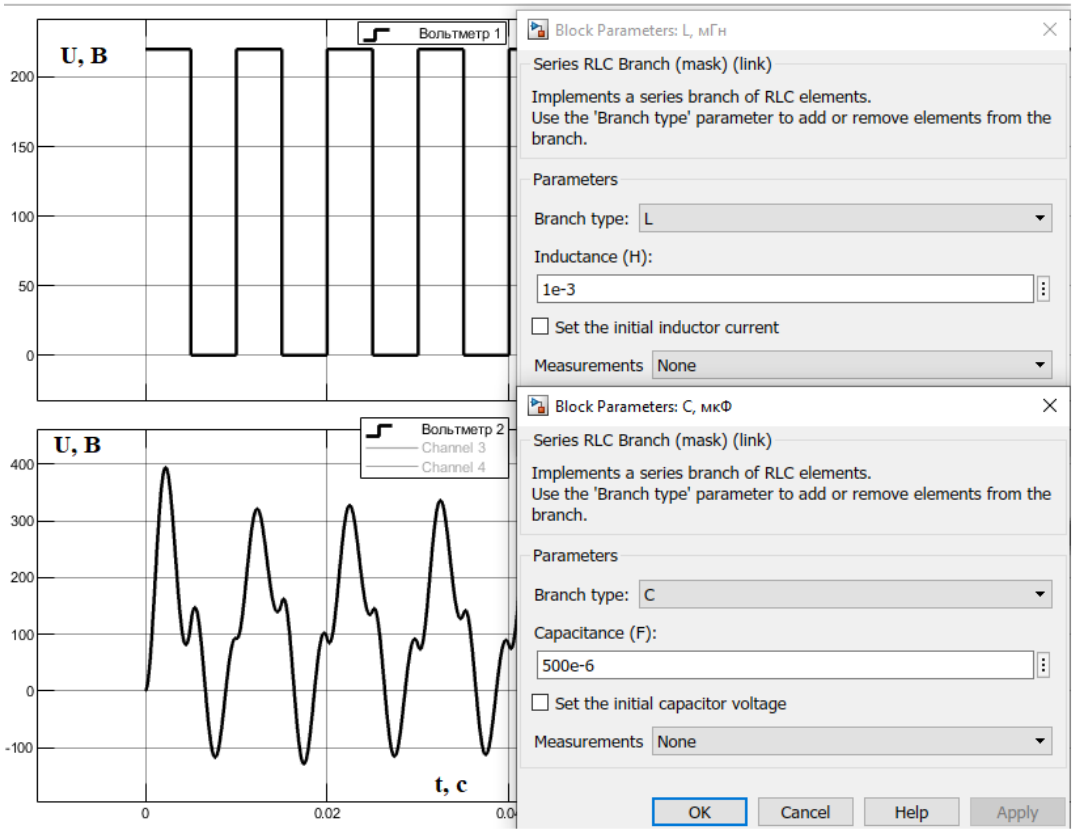


Рис. 5. Синусоида при уменьшении индуктивности

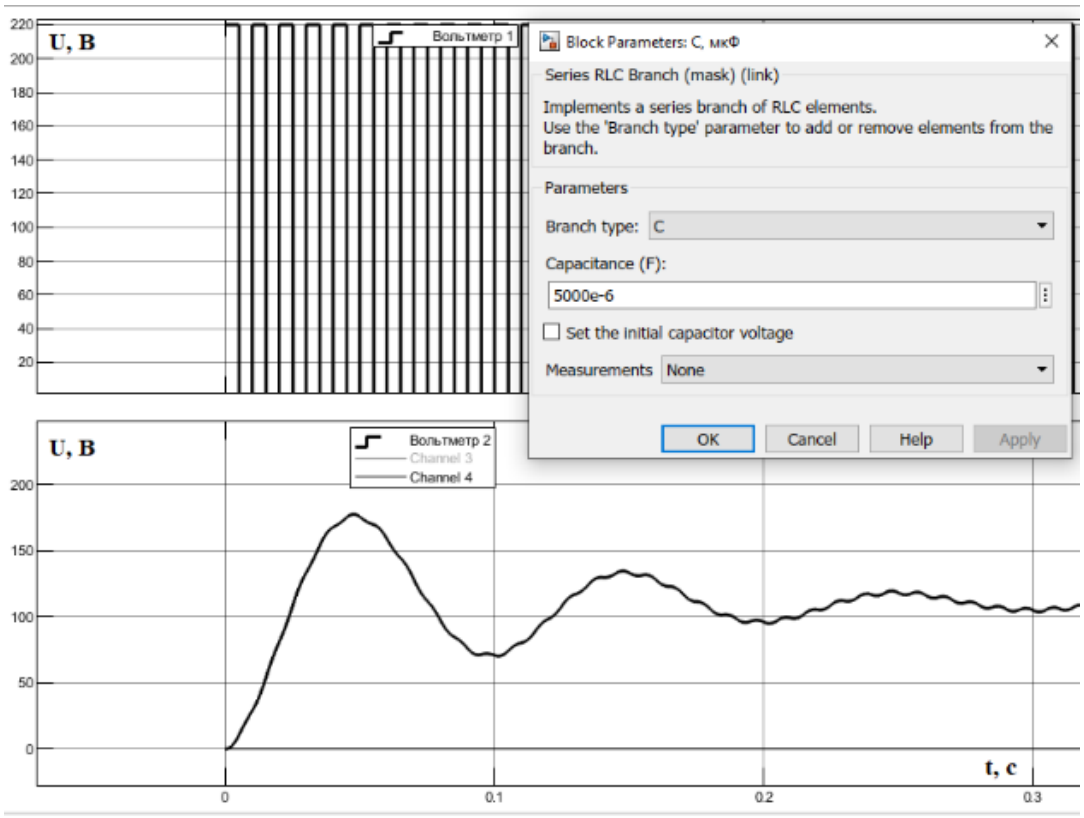


Рис. 6. Синусоида при увеличении емкости конденсатора

аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики.

Приоритетное направление модернизации российской экономики (направление конкурса № СП-2022 Совета по грантам Президента Российской Федерации) «Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива». Тема исследований – «Разработка и исследование фильтрокомпенсирующего устройства для повышения качества электроэнергии».

Список источников

1. *Варганова А. В.* О методах оптимизации режимов работы электроэнергетических систем и сетей // Вестн. ЮУрГУ. Сер.: Энергетика. 2017. Т. 17, № 3. С. 76–85.

2. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Юрайт-Издат, 2012. 701 с.

3. *Михеев Д. В.* Экспериментальное исследование частотных характеристик катушки-конденсатора при различных граничных условиях // Электричество. 2018. № 9. С. 52–55.

4. *Конесев С. Г., Хазиева Р. Т.* Математическое и физическое моделирование индуктивно-емкостных преобразователей // Электричество. 2020. № 1. С. 32–38. Doi: https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-1-32-38.

5. *Сычев Ю. А.* Фильтрокомпенсирующие устройства с активными преобразователями для повышения качества электроэнергии в электротехнических комплексах нефтегазовых предприятий: дис. … канд. техн. наук. СПб., 2021. 365 с.

6. *Neugebauer T. C., Phinney J. W., Perreault D. J.* Filters and components with inductance cancellation // IEEE trans. on ind. applicat. 2004. Vol. 40, № 2. P. 483–491.

7. Исследование фильтрокомпенсирующей функции многофункционального интегрированного электромагнитного компонента в составе системы индукционного нагрева / Р. Р. Афлятунов, П. И. Васильев, Р. В. Кириллов, Р. Т. Хазиева // Электротехн. и информ. комплексы и системы. 2022. Т. 18, № 1. С. 95–106.

8. *Хазиева Р. Т., Васильев П. И., Афлятунов Р. Р.* О возможности использования многофункционального интегрированного электромагнитного компонента в составе гибридных фильтрокомпенсирующих устройств // Завалишинские чтения – 22: сб. докл. XVII Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике. СПб.: ГУАП, 2022. С. 130–132.

УДК 621.311.61, 621.314.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-301-306**

Р. Т. Хазиева*
кандидат технических наук, доцент
А. В. Мухаметшин*
доцент
** Уфимский государственный нефтяной технический университет*

ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ: СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ И АНАЛИЗ ТОКОВ

При исследовании протекающих процессов в диэлектриках под воздействием внешнего электрического поля происходят процессы, называемые поляризацией. Поляризация диэлектриков, которая делятся на виды, понимаются разными авторами по-разному, происходит путаница в определениях. Проведен анализ всех видов поляризации, возникающих в диэлектрике, и даны четкие определения. Также существует некоторая путаница в определении разницы между такими определениями, как «ток утечки», «сквозной ток», «ток смещения», «полный ток», «ток проводимости» и «полный ток диэлектрика». Определены все токи, которые протекают в диэлектрике при воздействии внешнего электрического поля.
Ключевые слова: *изоляция, поляризация, ток, диэлектрик.*

R. T. Khazieva*
PhD, Tech., Associate Professor
A. V. Mukhametshin*
Associate Professor
** Ufa State Petroleum Technological University*

INSULATION OF ELECTRICAL EQUIPMENT: SUBSTITUTION DIAGRAMS AND CURRENT ANALYSES

In the study of flowing processes in dielectrics under the influence of an external electric field, processes called polarisation occur. Polarisation of dielectrics, which is divided into types, is understood differently by different authors and there is confusion in definitions. The authors have analysed all types of polarisation occurring in a dielectric and given clear definitions. There is also some confusion in determining the difference between such definitions as leakage current, through current, bias current, total current, conduction current and total dielectric current. The authors define all currents that flow in a dielectric when an external electric field is applied.
Keywords: *insulation, polarisation, current, dielectric.*

Изоляция электрооборудования разделяется на внешнюю и внутреннюю. К внешней изоляции относятся внешние поверхности твердой изоляции, например, изоляторов, воздушные промежутки воздушных линий. К внутренней изоляции относятся изоляция обмоток электрических машин. трансформаторов, кабелей, конденсаторов и других электрических аппаратов, т. е. изоляция выполняется с применением твердых, жидких и газообразных диэлектриков [1–4]. Далее в статье рассматривается внутренняя изоляции, так как в ней возникают более сложные задачи.

В процессе эксплуатации электрооборудования происходит процесс старения электрической изоляции, в ней возникают дефекты, такие как увлажнение, загрязнение, трещины, эрозия и т. д. Процесс возникновения дефектов в начальной стадии протекает весьма медленно, а затем на последних стадиях скачкообразно, заканчиваясь пробоем изоляции. Для определения состояния изоляции, наличия и характера в ней дефектов необходим анализ протекающих в ней процессов [5–8]. Целесообразно проводить анализ, используя возможности математического, компьютерного, имитационного моделирования, в основе которых лежит использование схем замещения изоляции [9, 10].

Электроизоляционные материалы есть пассивные диэлектрики. Основным свойством диэлектрических материалов является свойство поляризоваться. Под действием влияния внешнего электрического поля на диэлектрик, в нем происходит смещение положительных и отрицательных зарядов, данный процесс и называется поляризацией диэлектрика. Поляриза-

ционные процессы, происходящие в диэлектриках, во многом определяют возникновение в них дефектов, а стало быть, и эксплуатационные свойства электроизоляционных материалов. Процесс поляризации зависит от строения диэлектрика и может протекать мгновенно без рассеяния энергии, т. е. без выделения энергии, и замедлено и сопровождается рассеянием энергии [11–13]. Приведем анализ всех видов поляризации, возникающих в диэлектрике.

На сегодняшний день разными авторами дается множество определений такого значимого понятия, как виды поляризации, но по своей сути в каждом определении имеется в виду следующее.

ГОСТ 21515-76 определяет следующие виды поляризации в диэлектриках.

1. Электронная поляризация – электрическая поляризация, обусловленная упругим смещением и деформацией электронных оболочек относительно ядер в диэлектрике.

2. Ионная поляризация – электрическая поляризация, обусловленная упругим смещением разноименно заряженных ионов относительно положения равновесия в диэлектрике.

3. Дипольная (ориентационная, релаксационная, тепловая) поляризация – электрическая поляризация, обусловленная преимущественной ориентацией электрических моментов диполей в одном направлении в диэлектрике.

4. Миграционная (высоковольтная, междуслойная) поляризация – электрическая поляризация неоднородного диэлектрика, обусловленная перераспределением свободных зарядов в его объеме.

5. Спонтанная поляризация – электрическая поляризация, возникающая в диэлектрике самопроизвольно, без внешних воздействий.

6. Доменная поляризация – электрическая поляризация сегнетоэлектрика, обусловленная преимущественной ориентацией доменов в одном направлении.

7. Остаточная поляризация – электрическая поляризация, сохраняющаяся после прекращения внешних воздействий на диэлектрик.

В активных диэлектриках проявляются электронная и ионная поляризация, также данные виды поляризации называют быстрыми поляризациями. В пассивных диэлектриках, к которым и относятся электроизоляционные материалы, проявляются дипольная и миграционная поляризации. Основные характеристики рассматриваемых видов поляризации приведены таблице.

Основные виды поляризации

<table>
<tr><th>Вид поляризации</th><th colspan="2">Время поляризации, с</th><th>Влияние на качество изоляции</th><th>Вызываемые дефекты</th><th>Виды диэлектриков</th></tr>
<tr><td>Электронная</td><td rowspan="2">Быстрая поляризация</td><td>10^{-15}</td><td rowspan="2">Существенное влияние отсутствует</td><td rowspan="2">Существенное влияние отсутствует, так как не вызывает рассеяния энергии в диэлектрике</td><td>Все виды диэлектрика</td></tr>
<tr><td>Ионная</td><td>10^{-13}</td><td>Неорганические стекло различного состава, керамические материалы, электротехнический фарфор</td></tr>
<tr><td>Дипольная (ориентационная, релаксационная, тепловая)</td><td rowspan="2">Медленная поляризация</td><td>10^{-10}–10^{-7}</td><td>Уменьшение срока службы изоляции</td><td rowspan="2">Увеличение потерь. Увеличение тангенса угла потерь. Нагрев изоляции</td><td>Компаунды, бакелит, аминопласты</td></tr>
<tr><td>Миграционная (высоковольтная, междуслойная)</td><td>10^{-4}–10^{4}</td><td>Уменьшение срока службы изоляции</td><td>Технические диэлектрики</td></tr>
<tr><td>Спонтанная</td><td rowspan="3">Замедленная поляризация</td><td>10^{-3}–10^{5}</td><td>Изменение электрических свойств диэлектриков, таких как проводимость, диэлектрическая проницаемость</td><td rowspan="3">-</td><td>Сегнетоэлектрики, титан бария</td></tr>
<tr><td>Доменная</td><td>10^{3}–10^{4}</td><td>Уменьшение срока службы изоляции</td><td>Сегнетоэлектрики, такие как сегнетова соль, титанат бария, конденсаторная керамика</td></tr>
<tr><td>Остаточная</td><td>Месяцы, годы</td><td>Уменьшение срока службы изоляции</td><td>Электреты</td></tr>
</table>

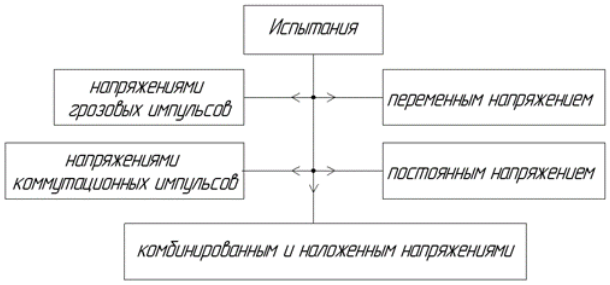


Рис. 1. Виды испытания

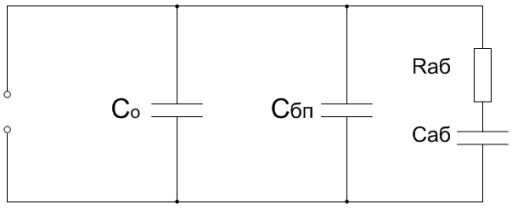


Рис. 2. Процессы поляризации в электроизоляционных материалах: C_o – собственная емкость электродов; $C_{бп}$ – быстрая поляризация; $R_{аб}$ и $C_{аб}$ – медленная поляризация

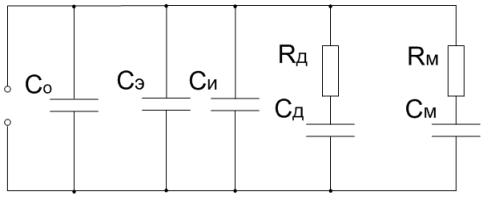


Рис. 3. Полная схема, показывающая процессы поляризации в электроизоляционных материалах: C_o – собственная емкость электродов; $C_э$ и $C_и$ – соответствуют быстрым электронной и ионной поляризациям; $C_д$ и $R_д$ – дипольная (ориентационная, релаксационная, тепловая) поляризация; $C_м$ и $R_м$ – соответствуют миграционной поляризации

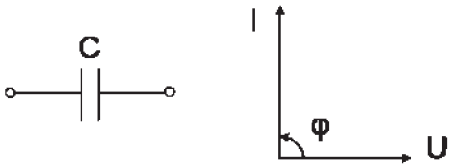


Рис. 4. Схема замещения диэлектрика без потерь

Электроизоляция относится к пассивным диэлектрикам, и в ней могут проявляться первые четыре типа поляризаций, т. е. электронная, ионная, дипольная, миграционная. Поляризации спонтанная, доменная и остаточная свойственны активным диэлектрикам, которые не используются в качестве электрической изоляции.

Для определения состояния изоляции эксплуатируемого оборудования переменного тока частотой 50 Гц и частей классов напряжения от 1 до 750 кВ, согласно ГОСТ 55194-2012, проводятся следующие виды испытания изоляции (рис. 1).

Самой первой ступенью перед проведением испытаний нужно изучить поведение изоляции при приложении разной форы и амплитуды напряжения, и для этого рассматриваются приближенные схемы замещения изоляции.

Все процессы поляризации, происходящие в электроизоляционных материалах, можно описать схемой замещения, показанной на рис. 2.

Более полная схема, показывающая все процессы поляризации, протекающие в электроизоляционных материалах, приведена на рис. 3.

Быстрая поляризация, к которой относится ионная и электронная поляризации, происходит без потерь и поглощение энергии обратимо, поэтому диэлектрик, обладающий данными видами поляризации, может быть представлен идеальным конденсатором без потерь, у которого ток опережает напряжение на 90° (рис. 4).

Медленная поляризация, к которой относится дипольная и миграционная поляризации, происходит с рассеянием тепла, вызывающий нагрев диэлектрика, вследствие поворота диполей в направлении поля, преодолевая сопротивление. Диэлектрик, обладающий данными видами поляризации, может быть представлен в виде последовательно и параллельно включенного идеального конденсатора и резистора (рис. 5).

Существует некоторая путаница в определении разницы между такими определениями, как «ток утечки», «сквозной ток», «ток смещения», «полный ток», «ток проводимости» и «полный ток диэлектрика». Рассмотрим токи, протекающие в диэлектрике. Согласно [1], под полным током понимается сумма токов утечек и

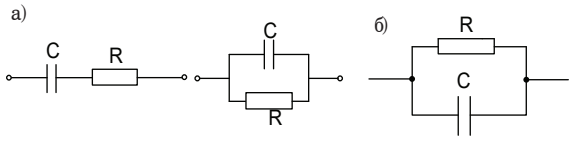


Рис. 5. Схема замещения диэлектрика с потерями: а – последовательное соединение; б – параллельное соединение

токов абсорбции, данное суждение полным образом не отражает все процессе протекающие в диэлектрике.

В *ГОСТ 21515-76* «Материалы диэлектрические. Термины и определения» даны следующие определения.

1. Ток утечки диэлектрика – ток в диэлектрике, обусловленный приложением не изменяющегося во времени электрического напряжения.

2. Сквозной ток диэлектрика – постоянная составляющая тока утечки диэлектрика.

3. Ток абсорбции диэлектрика – ток, обусловленный перераспределением свободных зарядов в объеме диэлектрика.

В *ГОСТ 19880-74* «Электротехника. Основные понятия. Термины и определения» даны следующие определения.

1. Ток смещения – скалярная величина, равная производной во времени от потока электрического смещения сквозь рассматриваемую поверхность.

2. Полный ток – скалярная величина, равная сумме тока проводимости и тока смещения сквозь рассматриваемую поверхность.

3. Ток проводимости – скалярная величина, равная производной по времени от электрического заряда, переносимого носителями заряда сквозь рассматриваемую поверхность.

4. Электрический ток поляризации – явление движения связанных заряженных частиц в диэлектрике при изменении его поляризации.

Изучив научно-техническую документацию, авторы пришли к мнению, что в диэлектрике токи будут определяться по следующим выражениям:

$$I_{\text{утечки}} = I_{\text{полный}} = I_{\text{активный}} + I_{\text{реактивный}}; \quad (1)$$

$$I_{\text{активный}} = I_{\text{проводимости}} = I_{\text{сквозной}} = I_{\text{прямой}}; \quad (2)$$

$$I_{\text{реактивный}} = \sum I_{\text{поляризации}} = \\ = I_{\text{смещения}} \approx I_{\text{абсорбции}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{утечки}}$ – ток утечки; $I_{\text{полный}}$ – полный ток; $I_{\text{активный}}$ – активный ток; $I_{\text{реактивный}}$ – реактивный ток; $I_{\text{сквозной}}$ – сквозной ток; $I_{\text{смещения}}$ – ток смещения (ток быстрых поляризаций); $I_{\text{проводимости}}$ – ток проводимости; $I_{\text{поляризации}}$ – ток поляризации; $I_{\text{абсорбции}}$ – ток абсорбции (ток медленных поляризаций).

Под действием переменного электрического поля на диэлектрик в нем происходит поглощение тепловой энергии, которая выделятся

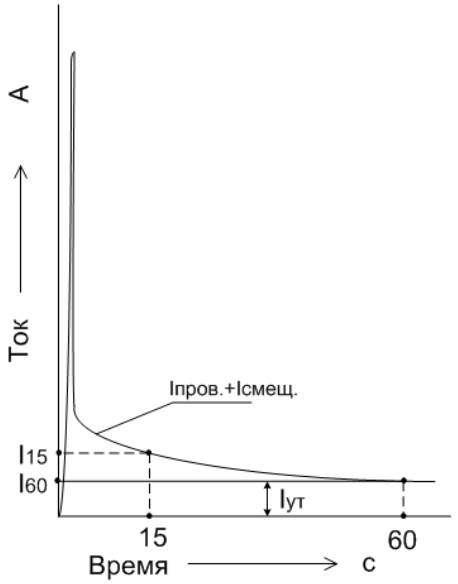


Рис. 6. Зависимость тока через диэлектрик за время

в виде потерь тепла. Данная энергия определяет собой диэлектрические потери в изоляции.

Важнейшим параметром, характеризующим диэлектрик (электрическую изоляцию), являются диэлектрические потери, которые характеризуются углом диэлектрических потерь и тангенсом угла диэлектрических потерь.

Рассмотрим данные параметры:

Согласно *ГОСТ 21515-76* «Материалы диэлектрические. Термины и определения»:

диэлектрические потери – мощность, выделяющаяся в диэлектрике при воздействии на него электрического поля;

угол диэлектрических потерь – угол между векторами плотностей переменного тока проводимости и тока смещения диэлектрика на комплексной плоскости;

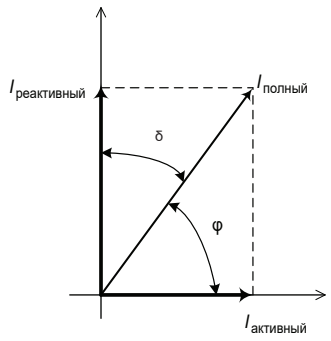


Рис. 7. Изображение угла диэлектрических потерь

коэффициент диэлектрических потерь – величина, равная произведению относительной диэлектрической проницаемостью на тангенс угла диэлектрических потерь.

В изоляции, выполненной из любых диэлектрических материалов, при наличии диэлектрических потерь угол сдвига фаз между напряжением и током меньше 90°; разность между углом 90° и углом сдвига фаз обозначается δ и называется углом диэлектрических потерь.

При приложении переменного синусоидального напряжения на диэлектрик, в нем протекают емкостной ток, ток смещения и активный ток, обусловленные диэлектрическими потерями. Коэффициент диэлектрических потерь определяется по (4):

$$\frac{I_{\text{активный}}}{I_{\text{реактивный}}} = \text{tgä}. \qquad (4)$$

Для характеристики состояния изоляции электрооборудования составляется схема замещения, отклонение в величинах элементов схемы позволяет определить характер возникающих дефектов в изоляции.

На рис. 8 приведен пример элементарной схемы замещения изоляции трансформатора, также данная схема аналогичная схеме замещения электродвигателя переменного тока.

К диэлектрическим материалам, применяемым в электроизоляционных материалах, предъявляются весьма высокие требования. Одно из требований – это длительная электрическая прочность, так как она определяет условие надежности электрооборудования. А надежность с экономической целесообразности в том, чтобы затраты на ее проведение и стоимость ремонта оказались меньше ущерба от аварий. Но для правильного проведения испытания изоляции требуется изучить процессы, протекающие в диэлектрике [14–16]. На сегодняшний день в технической литературе существует множество различных определений и суждений о понятии токов, протекающих в диэлектриках. Нами раскрыта теория протекающих токов в диэлектрике. Проведен анализ схем замещения различной изоляции электрооборудования.

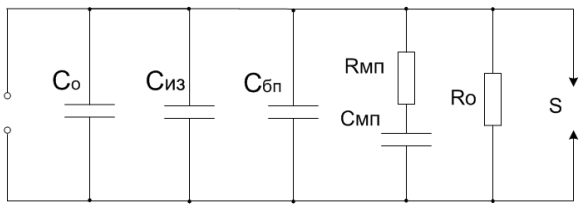


Рис. 8. Схема замещения изоляции: C_0 – емкость воздушного включения; $C_{из}$ – емкость изоляции первичной и последующей обмотки трансформат ора, пФ; $C_{бп}$ – быстрые поляризации, протекающие в изоляции трансформатора; $C_{мп}$–$R_{мп}$ – ветвь, характеризующая медленные поляризации, эта ветвь определяет потери в изоляции; R_0 – сопротивление изоляции постоянному току; S – разрядное напряжение изоляции

Исследования выполнены на средства гранта Стипендии Президента Российской Федерации в 2022–2024 гг. для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики.

Приоритетное направление модернизации российской экономики (направление конкурса № СП-2022 Совета по грантам Президента Российской Федерации) «Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива». Тема исследований «Разработка и исследование фильтрокомпенсирующего устройства для повышения качества электроэнергии».

Список источников

1. *Помогаев Ю. М., Картавцев В. В., Лакомов И. В.* Диагностика изоляции электрооборудования // Вестн. Воронеж. гос. аграр. ун-та. 2016. № 1 (48). С. 98–104.

2. *Серебряков А. С., Дулепов Д. Е., Осокин В. Л.* Техника высоких напряжений. Перенапряжения в электрических системах и защита от них: учебник. Старый Оскол, 2021.

3. *Бочаров Ю. Н., Дудкин С. М., Титков В. В.* Техника высоких напряжений: учеб. пособие. М.: Юрайт, 2019. 264 с.

4. Методы и устройства измерения сопротивления изоляции электроэнергетических объектов и их классификация / В. И. Лачин, К. Уи. Нгуен, К. Ю. Соломенцев, И. Г. Балабан // Известия высших учеб. завед. Северо-Кавказ. регион. Техн. науки. 2015. № 1 (182). С. 84–89.

5. Расчет резонансных частот при диагностике силовых трансформаторов / Н. В. Силин, Н. Г. Винаковская, А. Н. Шеин, В. С. Чайка // Высокие технологии и инновации в науке: сб. избр. ст. Междунар. науч. конф. 2019. С. 198–204.

6. *Глухов Д. А., Титов Д. Е., Угаров Г. Г.* Оценка риска отказа изоляции воздушных линий электропередачи путем анализа данных синхронизированных векторных измерений // Электроэнергетика

глазами молодежи – 2018: Материалы IX Междунар. молодеж. науч.-техн. конф. 2018. С. 249–252.

7. *Глухов Д. А., Титов Д. Е., Угаров Г. Г.* Использование данных синхронизированных векторных измерений для мониторинга состояния изоляции воздушных линий электропередачи // Вопр. электротехнологии. 2018. № 1 (18). С. 46–52.

8. *Алеев Р. М., Зарипов Д. К., Лопухова Т. В.* Комплексный подход к дистанционной диагностике состояния подвесной изоляции // Известия высших учеб. завед. Проблемы энергетики. 2004. № 3–4. С. 78–86.

9. *Екимуков С. С., Цивилёв И. Ю.* Особенности эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (защита от перенапряжений, диагностика и испытания) // Кабели и провода. 2011. № 2 (327). С. 22–27.

10. *Серебряков А. С., Семенов Д. А.* Оценка сопротивления изоляции с помощью анализа кривых саморазряда // Электричество. 2016. № 7. С. 34–42.

11. *Конесев С. Г., Мухаметшин А. В., Кириллов Р. В.* Выбор схемы ВИУ для работы в резонансном режиме // I Междунар. науч.-техн. конф.: сб. науч. тр. Уфа: УГНТУ. 2013. С. 209–215.

12. Новые схемотехнические решения резонансной высоковольтной испытательной установки / С. Г. Конесев, А. В. Мухаметшин, Р. Т. Хазиева, Д. А. Стрижев // Инновационные направления развития электропривода, электротехнологий и электрооборудования: межвуз. сб. науч. тр. Уфа: УГНТУ, 2012. С. 178–183.

13. Патент 132213 РФ, МПК G01R. Компактная испытательная установка для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением / Конесев С. Г., Мухаметшин А. В. № 2013108529; заявл. 10.09.13. Бюл. № 25.

14. *Конесев С. Г., Хазиева Р. Т.* Анализ стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей при различных способах подключения гибридных электромагнитных элементов // Электротехн. системы и комплексы. 2017. №1 (34). С. 49–55. Doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55.

15. *Хазиева Р. Т., Мухаметшин А. В., Горшенин А. И.* Исследование и разработка схемы измерения переменного тока при испытании изоляции // Электротехн. и информ. комплексы и системы. 2020. Т. 16, № 4. С. 46–55.

16. *Хазиева Р. Т., Мухаметшин А. В.* Разработка схемы измерения переменного тока при испытании изоляции высоковольтного оборудования // Завалишинские чтения – 23: сб. докл. XVIII Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике (СПб., 18–19 апр. 2023). СПб.: ГУАП, 2023. С. 174–176. Doi: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-174-176.

ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 537.523/.527, 533.9:51-73, 621.039.6 DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-307-310

В. В. Кузенов*
доктор физико-математических наук, профессор
А. Г. Полянский*
аспирант
** Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЫ МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО КОМПРЕССОРА

Перспективность применения магнитоплазменных компрессоров (МПК) в малогабаритных источниках излучения и импульсных плазменных струях для снижения их массогабаритных характеристик, разработки путей повышения их физико-технических характеристик и управления интегральным выходом широкополосного излучения обосновывается большим количеством публикаций. Высокоскоростные струи, формируемые магнитоплазменным компрессором, могут быть использованы для термоядерных устройств, аэронавтики, механических и энергетических систем. Представлено тепловое моделирование радиационно-магнитоплазменных динамических процессов мощных электроразрядных источников.
Ключевые слова: *магнитоплазменный компрессор, математическое моделирование, магнитное поле, плазмодинамика.*

V. V. Kuzenov*
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor
A. G. Polyanskiy*
PhD Student
** Bauman Moscow State Technical University*

MODELING OF PLASMA DYNAMICS PARAMETERS OF MAGNETOPLASMA COMPRESSOR

The prospect of using magnetoplasma compressor in compact radiation sources and pulsed plasma jets to reduce their mass and size characteristics, the formulation of ways to improve their physical and technical characteristics and control the integral output of broadband radiation is justified by a large number of publications. High velocity jets formed by magneto plasma compressor can be used for fusion devices, aeronautics, mechanical and power engineering systems. Thermal modeling of radiation-magneto plasma dynamic processes of powerful electric discharge sources is presented.
Keywords: *magnetoplasma compressor, mathematical model, magnetic field, plasma dynamics.*

В данной работе подробно изучена плазма разряда магнитоплазменного компрессора (МПК) в плазмодинамическом режиме [1–7]. Внешней граничной областью разряда является характерная плазмодинамическая зона торможения потока светоэрозионной плазмы на окружающем газе, состоящая из сильных газодинамических ударных волн в окружающем газе (УВГ) и в плазменном потоке (УВП) и контактной границы (КГ(ПГ)), разделяющей область ударно-сжатых газа и плазмы. Существенное увеличение (по сравнению с переходным режимом) скоростей в приосевой области потока светоэрозионной плазмы обеспечивает усиление интенсивности ударных волн в области плазмодинамического торможения на газе: УВГ является ионизирующей УВ. Тепловое излучение, генерируемое внутренними областями плазмы разряда, приводит к возникновению радиационной волны (РВ), распространяющейся по невозмущенному газу и обеспечивающей нагрев прилегающих к УВГ слоев окружающего газа до температур 1÷2 кК.

Основными структурными областями светоэрозионной плазмы разряда являются:

– область кумулятивной струи с повышенными плотностями и температурами, ограниченная системой разрывов (область I);

– область основного электромагнитного ускорения светоэрозионной плазмы диэлектрика, ограниченная системой разрывов и поверхностью торца МПК (область II);

– область течения плазмы диэлектрика, прошедшей через конический магнитогазодинамический ударно-волновой разрыв (область III);

– область вторичного электромагнитного ускорения, ограниченная системой разрывов (область IV).

Среди особенностей динамики положения границ структурных областей разряда можно выделить значительно более сильное, чем в переходном режиме, «оттеснение» окружающего газа от торца МПК плазменным светоэрозионным потоком: на момент максимума разрядного тока координата положения приосевой зоны УВГ существенно превосходит размер миделя МПК. На фазе роста разрядного тока движение приосевой УВГ происходит с ускорением.

В работах [8–14] представлена математическая модель разрядов МПК в газах для широкого диапазона изменения основных параметров и окружающей газовой среды. Эта модель основана на нестационарной осесимметричной двумерной системе уравнений динамики вязкой однотемпературной радиационной плазмы. Разработанное авторами численное решение нестационарной двумерной радиационной газодинамической модели основано на методе разбиения по физическим процессам и пространственным направлениям. Разработанный вычислительный код использует многоблочную многосеточную технологию для расчетов на неортогональных структурированных сетках. На основе проведенных расчетных исследований получены данные о режимах, структурах и динамике плазмы МПК торцевого типа для переходного мощностного режима.

Как видно из представленных результатов, существенные количественные изменения, по сравнению с переходным режимом, произошли в зоне основного электромагнитного ускорения, параметры плазмы в которой определяют параметры плазмы в зоне кумуляции. В более энергетически мощных режимах МПК-разрядов, осуществляемых в менее плотных газах, в области II значительно возрастает величина скорости плазмы. Достигаемые на границах зоны II скорости плазмы, равные местным альфвеновским скоростям, составляют значения от 10 до 60 км/с.

На начальной стадии разряда происходит нестационарный переход от исходного (моделирующего фазу «пробоя» межэлектродного промежутка) к квазистационарному состоянию. С момента $t=0$ силовой конденсатор начинает разряжаться через слой газовой плазмы, примыкающий к поверхности электродной системы, обеспечивая выделение в нем джоулевой энергии и его разогрев. После достижения температур 20 кК газовая плазма начинает излучать потоки света с плотностью $q_s \geq 0{,}1 \div 1$ МВт/см^2, вызывающих нагрев и испарение материала вставки. Здесь отметим, что начальная фаза формирования квазистационарного плазменного образования характеризуется отсутствием плазмы продуктов эрозии центрального электрода. Это связано с временной задержкой испарения центрального электрода. Длительность времени задержки может изменяться в диапазоне $(0{,}1 \div 0{,}4)t_m$ и зависит от теплофизических свойств материала электрода, плотности окружающей среды и энергомощностного режима разряда. Поступающий в зону разряда светоэрозионный пар ионизуется и нагревается в результате совместного действия радиационных потоков, плазмодинамического и джоулева нагрева. Под действием газодинамических и пондермоторных сил происходит схлопывание на оси МПК, ускорение светоэрозионной плазмы диэлектрика и оттеснение газа из областей, примыкающих к поверхности электродной системы. Ток разряда начинает протекать главным образом по более высокотемпературным областям, заполненных светоэрозионной плазмой, обеспечивая её дальнейший нагрев, ускорение и формирование характерных квазистационарных РПД-структур. Моментом окончания начальной стадии является момент формирования характерной структуры внешней области разрядной плазмы: по невозмущенному газу распространяется ударная волна в газе, в плазме светоэрозионных паров возникает ударная волна и контактная граница, разделяющая области ударно-сжатых газа и плазмы светоэрозионных паров. Длительность начальной стадии не превышает $t_н \leq 1 \div 2$ мкс (в зависимости от темпа ввода энергии в плазменную нагрузку).

Магнитное число Рейнольдса $Re_m=VL_X/\nu_m$ меняется в диапазоне $Re_m \in [0{,}01,\ 1]$. Здесь $L_X \sim 0{,}01$ м – характерный пространственный размер; $\nu_m=c^2/4\pi\sigma \sim 3\cdot(10^2 \div 10^1)$ м^2/с – магнитная вязкость плазмы. Данная оценка показывает необходимость учета при моделировании индуцированных электрических полей в поверхностных разрядах, например, в линейно-стабилизированном поверхностном разряде (ЛСПР) [15].

Интервал изменения магнитного числа Эйлера оценим из соотношения: $Eu_m=P_M/(\rho V^2/2) \sim$

$\sim 10^2 \div 10^{-1}$. Здесь величину характерного магнитного давления $P_М = \frac{H^2}{8\pi}$ можно оценить с помощью выражения $P_М \approx \pi J_X^2/(2c^2b^2) \approx (3 \div 10^3)$ атм $= 3 \cdot (10^5 \div 10^8)$, где $b \approx 0{,}01$ м – характерный поперечный размер; $J_X \approx (20 \div 500)$ кА – характерная величина максимального значения тока, протекающего в плазме, которую можно приближенно оценить с помощью выражения $J_X \sim Q/(t_1/2)$ (где $Q = CU_O$ – заряд конденсаторной батареи). Отсюда видно, что влияние электромагнитных сил на движение плазмы разряда может быть существенным.

Излучательное число Больцмана, определяемое как $Bo = \pi q b/P_{ЭЛ}$ (где q – характерный суммарный поток излучения ЛСПР), при яркостных температурах $T_Я = (20 \div 100)$ кК имеет уровень ~1. Это означает, что широкополосное тепловое излучение плазмы играет важную роль в энергобалансе ЛСПР и радиационные процессы необходимо учитывать при разработке численной модели сильноточного излучающего разряда.

Вблизи межэлектродной вставки и электродов может образовываться так называемый слой Кнудсена (его толщина порядка 2–3 длин пробега $\lambda \sim n_e^{-1/3} \sim 10^{-8}$ м). Этот газо-плазменный слой весьма тонок (его поперечный размер сопоставим с толщиной ударной волны), по этой причине плазмодинамические параметры этого слоя представляются в виде разрыва (рассматриваются не в приближении физической кинетики) и описываются на основе общеизвестной модели Найта. Заметим, что такой подход применялся для описания процессов вблизи конденсированной преграды неоднократно для описания различных типов разрядов и показал свою полную адекватность. Таким образом, однотемпературное приближение (с учетом модели Найта) во всей разрядной зоне полностью себя оправдывает. Здесь также заметим, что длина пробега частиц λ в плазме такого разряда много меньше характерных пространственных размеров b, т. е. вязкими силами пренебрегаем.

Приведенные в работе результаты показывают, ярко выраженную зависимость от величины A, т. е. в зависимости от роли того или иного режима нагрева (омический, переходный и плазмодинамический), существуют три различных вида квазистационарных пространственных распределений параметров плазмы, по которым можно судить об особенностях возникающих структур и динамике распространения плазмы, а, следовательно, говорить о режимах осуществления разряда. Рассмотрим особенности РПД-структур и поведение основных параметров плазмы МПК-разряда в каждом из них.

Полученные в результате выполнения исследования данные могут быть использованы для решения широкого круга задач в разных областях науки и техники, включая создание плазменного двигателя, источника нейтронов и другие высокотемпературные приложения [16–27].

Список источников

1. Multi-pulse operation of coaxial magnetic plasma accelerator for dynamic synthesis of iron oxide powder / A. A. Sivkov [et al.] // Russian Physics Journal. 2019. V. 62. P. 1001-1008.

2. Высокояркостные источники теплового ВУФ излучения на основе плазмодинамических МПК-разрядов в газах / А. С. Камруков, Н. П. Козлов, Ю. С. Протасов, С. Г. Шашковский // ТВТ. 1989. Т. 27. С. 152–170.

3. *Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V., Frolko P. A.* Numerical simulation of the coaxial magneto-plasma accelerator and non-axisymmetric radio frequency discharge // Journal of physics: conference series. 2017. Vol. 830. P. 012049.

4. *Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V., Varaksin A. Yu.* Numerical modeling of individual plasma dynamic characteristics of a light-erosion MPC discharge in gases // Applied sciences. 2022. Vol. 12. P. 3610.

5. Математическая модель импульсного плазменного двигателя с предионизацией геликонным разрядом / В. В. Кузенов, С. В. Рыжков, П. А. Фролко, В. В. Шумаев // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: https://www.mai.ru/upload/iblock/24a/kuzenov-ryzhkov-shumaev-frolko_rus.pdf (дата обращения: 12.12.2023).

6. *Кузенов В. В., Рыжков С. В.* Численное моделирование взаимодействия мишени магнитно-инерциального термоядерного синтеза с плазменным и лазерным драйверами // ТВТ. 2021. Т. 59, № 4. С. 492–501.

7. Расчет, моделирование и проектирование генераторов низкотемпературной плазмы: учебник / Г. К. Клименко, В. В. Кузенов, А. А. Ляпин, С. В. Рыжков. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. 264 с.

8. *Ryzhkov S. V., Kuzenov V. V.* New realization method for calculating convective heat transfer near the hypersonic aircraft surface // ZAMP. 2019. Vol. 70. P. 46.

9. *Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V., Varaksin A. Yu.* The adaptive composite block-structured grid calculation of the gas-dynamic characteristics of an aircraft moving in a gas environment // Mathematics. 2022. Vol. 10. P. 2130.

10. *Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V., Varaksin A. Yu.* Computational and experimental modeling in

magnetoplasma aerodynamics and high-speed gas and plasma flows (a review) // Aerospace. 2023. Vol. 10. P. 662.

11. *Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V.* The qualitative and quantitative study of radiation sources with a model configuration of the electrode system // Symmetry. 2021. Vol. 13, № 6. P. 927.

12. *Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V., Varaksin A. Yu.* Simulation of parameters of plasma dynamics of a magnetoplasma compressor // Applied sciences. 2023. Vol. 13, № 9. P. 5538

13. *Pillai S., Hackam R.* Surface flashover of solid insulators in atmospheric air and in vacuum // J. appl. phys. 1985. Vol. 58, № 1. P. 146–153.

14. *Седов Л. И.* Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 438 с.

15. *Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V.* numerical simulation of pulsed jets of a high-current pulsed surface discharge // Computational thermal sciences. 2021. Vol. 13. P. 45–56.

16. *Mozgovoy A. G., Romadanov I. V., Ryzhkov S. V.* Formation of a compact toroid for enhanced efficiency // Physics of plasmas. 2014. Vol. 21. P. 022501.

17. *Ryzhkov S. V.* Comparison of a deuterium – helium-3 FRC and mirror trap for plasma confinement // Fusion science and technology. 2007. Vol. 51, № 2T. P. 190–192.

18. *Ryzhkov S. V.* Compact toroid and advanced fuel – together to the Moon?! // Fusion science and technology. 2005. Vol. 47, № 2T. P. 342–344.

19. *Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V.* Thermophysical parameter estimation of a neutron source based on the action of broadband radiation on a cylindrical target // Fusion science and technology. 2023. Vol. 79. P. 399–406.

20. *Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V.* Approximate calculation of convective heat transfer near hypersonic aircraft surface // Journal of enhanced heat transfer. 2018. Vol. 25, № 2. P. 181–193.

21. *Ryzhkov S. V.* Magneto-inertial fusion and powerful plasma installations (a review) // Applied sciences. 2023. Vol. 13, № 21. P. 6658.

22. *Рыжков С. В., Чирков А. Ю.* Системы альтернативной термоядерной энергетики. М.: Физматлит, 2017. 200 с.

23. *Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V.* Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure // Physics of plasmas. 2019. Vol. 26. P. 092704.

24. *Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V.* Estimation of the neutron generation in the combined magneto-inertial fusion scheme // Physica scripta. 2021. Vol. 96. P. 125613.

25. *Рыжков С. В.* Моделирование теплофизических процессов в магнитном термоядерном двигателе // Тепловые процессы в технике. 2009. № 9. С. 397–400.

26. *Polyansky A. G., Voronina E. A.* Influence of bremsstrahlung on the heat balance of high-temperature plasma // Materials. Technologies. Design. 2023. № 5 (15). P. 140–145.

27. *Shumeiko A. I., Telekh V. D., Ryzhkov S. V.* Probe diagnostics and optical emission spectroscopy of wave plasma source exhaust // Symmetry. 2022. Vol. 14, № 10. P. 1983.

УДК 533.9.07 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-311-314**

А. А. Сафронов*
доктор технических наук, заведующий отделением
В. Е. Кузнецов*
кандидат технических наук, заведующий лабораторией
Ю. Д. Дудник*
научный сотрудник
В. Н. Ширяев*
старший научный сотрудник
О. Б. Васильева*
научный сотрудник
** Институт электрофизики и электроэнергетики РАН*

ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ

Рассмотрены основные плазменные способы модификации изделий, используемых в настоящее время. Востребованность плазменных методов обработки не ограничивается традиционными машиностроительными приложениями и возможна для решения широкого круга технических задач. В данной работе представлены краткий обзор современного состояния данной проблематики и перспективные конструкции плазменной техники, разработанной в Институте электрофизики и электроэнергетики РАН.
Ключевые слова: *плазменные технологии, модификация поверхности, электрическая дуга.*

A. A. Safronov*
Dr. Sc., Tech., Department Head
V. E. Kuznetsov*
PhD, Tech., Head at Laboratory
Yu. D. Dudnik*
Research Employee
V. N. Shiryaev*
Senior Research Employee
O. B. Vasilieva*
Research Employee
** Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences*

PLASMA SURFACE MODIFICATION METHODS

The main plasma methods for modifying currently used products are considered. The demand for plasma processing methods is not limited to traditional mechanical engineering applications, and they can be used for solution of a wide range of technical problems. This paper presents a brief overview of the current state of this issue and promising designs of plasma technology developed at the Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences.
Keywords: *plasma technologies, surface modification, electric arc.*

Введение

Со времени первой промышленной революции середины XVIII в. паровая энергия, электричество и связанные с ними технологии значительно улучшили качество жизни современного общества. Можно полагать, что в дальнейшем потребление энергии вряд ли будет значительно уменьшаться. В условиях серьезного истощения запасов традиционного ископаемого топлива и проблем загрязнения окружающей среды крайне важен бережный подход к различного рода природным ресурсам. Это относится не только к разумному потреблению энергии и использованию углеводородного сырья, но и к максимально рациональному использованию природных ресурсов и материалов на всех стадиях промышленного производства. В настоящее время в различных отраслях техники находят широкое применение многочисленные виды упрочняющей обработки [1, 2], для улучшения эксплуатационных характеристик, уменьшения затрат на производство и снижение стоимости готовых изделий. Об-

работка поверхности изделия и ее модификация плазменными методами позволяет достичь этих целей, а эффективность этого процесса делает возможным выделить ее в отдельное важное направление плазменных технологий.

Основные свойства низкотемпературной плазмы

Плазма, которая состоит из конгломерата частиц (атомов, молекул, ионов и радикалов) образуется путем ионизации газа. Причиной ионизации служит действие электромагнитного излучения, нагрев газа, что приводит к увеличению кинетической энергии частиц, межмолекулярные взаимодействия с образованием положительно заряженных ионов [3].

Методы генерации плазмы обычно включают горение, микроволновое излучение, электрический разряд. В начале XX в. И. Ленгмюр впервые использовал термин «плазма» для описания области, содержащей равное количество ионов и электронов. Плазма относится к четвертому состоянию материи (ионизированный газ), в котором плазма создается путем активации газа с достаточной энергией. В таблице представлена классификация плазмы.

Высокотемпературная равновесная плазма существует при экстремально высоких температурах, включает в себя реакции термоядерного цикла, что, возможно, является основой энергетики будущего. Наиболее актуальными с точки зрения практического применения являются технологии, основанные на использовании термической и нетермической низкотемпературной плазмы. Нетермическую плазму можно разделить на тлеющий разряд, коронный разряд, диэлектрический барьерный разряд, радиочастотный разряд и микроволновый разряд. В нетермической плазме температура электронов может достигать 10^3–10^5 К (1–10 эВ), это является основой применения «холодной» плазмы для решения технологических задач.

Получение термической плазмы осуществляется электрической дугой, которая может быть реализована в плазмотронах постоянного и переменного тока.

Области применения термической плазмы

Термическая плазменная технология показала себя перспективной и экологически чистой для модификации поверхности и синтеза наноматериалов [4], эта технология применима для широкого круга приложений: очистка и уничтожение отходов, плазмохимия и т. д. [5, 6]. Существуют и другие технологические задачи, в решении которых используется данный вид плазменного оборудования.

Одним из примеров является модификация или синтеза наноматериалов, где большинство реакций основано на химии свободных радикалов [7]. Упрощенно плазменный процесс можно описать следующим образом: свободные радикалы сначала атакуют поверхность материалов, а затем в ходе обмена энергией происходит ряд физико-химических реакций (от свободных радикалов к материалам подложки), позволяя тем самым изменить физические и химические свойства.

Можно выделить некоторые особенности применения плазменных технологий:

1) разрыв химических связей и воздействие на поверхность материала;

2) реакция с образованием новых химических связей, и модификация материалов;

3) химическое осаждение и образование покрытий (тонкой пленки) на поверхности.

Использование плазмы для синтеза или модификации материалов имеет множество неза-

Классификация плазмы

Плазма	Состояние	Пример
Высокотемпературная (равновесная)	$T_e=T_i=T_h$ $n_e \geq 10^{20}\text{m}^{-3}$	Лазерный нагрев $T_e=T_i=T_h \approx 10^6$–10^8 K
Термическая низкотемпературная (квази-равновесная)	$T_e \approx T_i \approx T_h$ $n_e \geq 10^{20}\text{m}^{-3}$	Дуговая плазма (столб) $T_e \approx T_i \approx T_h \approx 10^4$ K
Нетермическая низкотемпературная (неравновесная)	$T_e >> T_h$ $n_e < 10^{19}\text{m}^{-3}$	Коронный разряд $T_e \approx 10^4$–10^5 K; $T_h \approx 3 \cdot 10^2$–10^3 K

Примечание: T_e – температура электронов; T_i – температура ионов; T_h – температура тяжелых частиц; n_e – плотность электронов. Состояние относится к различным параметрам во время процесса разряда.

менимых преимуществ по сравнению с традиционными методами. Например, по скорости реакции. Исходя из этого, можно сделать вывод, что плазменные методы (использование термической и нетермической плазма) могут применяться для обработки и модификации поверхности, где определенный вид оборудования будет нужен для решения тех задач, с которыми он справится максимально эффективно.

Покрытия на основе углерода могут использоваться для изменения свойств пленочных материалов, особенность атома углерода заключается в его способности образовывать прочные связи между атомами, которые характеризуются различными типами гибридизации электронных орбиталей. Применяя различные формы углерода можно получить большое количество соединений обладающих разнообразными свойствами. Плазменные технологии нанесения могут использоваться для создания покрытий различной толщины, в том числе порядка единиц нанометров, обладающих отличными от материала тонкой пленочной подложки, при этом спектр применения такой технологии не ограничивается полимерными материалами, модификацию углеродом используют для создания высокопрочных и тугоплавких металлов [8]. Это открывает перспективные возможности для применения и использования углерода в качестве материала для создания модифицирующих покрытий для широкого круга изделий различного назначения.

Результатом воздействия плазмы на поверхность материала является нагрев, очистка от органических загрязнений; модификация для улучшения химических и физических взаимодействий, расплавление, абляция. Как указывалось выше, различные плазменные технологии применимы (наилучшим образом) для решения тех или иных задач.

Опубликованная работа [9] посвящена исследованию возможности соединения полимерных материалов (тефлона (PTFE) и перфторалкана (PFA), полидиметилсилоксана (PDMS)) без склеивания с обеспечением высокой механической прочности соединения. В статье применялась обработка с помощью холодной и термической плазмы. Сообщалось, что обычная низкотемпературная плазменная обработка минимально улучшает адгезионные свойства политетрафторэтилена (PTFE), в то время как термическая плазменная обработка значительно улучшает их. Максимальный эффект был достигнут при одновременном использовании двух плазменных методов обработки поверхностей.

Тем не менее, в промышленности существуют задачи, для решения которых наилучшим образом подходит использование термической плазмы. Среди них выделяются задачи, связанные с металлообработкой.

Традиционным методом поверхностного упрочнения железоуглеродистых сплавов является термообработка поверхности концентрированными потоками энергии. В результате твердость стали и чугуна возрастает в 2–3 раза, с HRC20…25 до HRC50…65. Благодаря этому износ деталей уменьшается, а долговечность может быть увеличена в несколько раз.

Эта технология возникла очень давно, но и сейчас успешно используется для широкого круга задач. При этом замена традиционного нагрева на плазменный позволяет значительно увеличить эффективность данной процедуры при сохранении высочайшего качества и обеспечивает снижение затрат на производство машиностроительной продукции. В ходе обработки низколегированных сталей упрочняется слой материала толщиной до 3 мм, применение плазменной закалки особенно заметно для сталей с содержанием углерода 0,4 % и выше, а также перлитных чугунов [10].

Поверхностная закалка является не единственным, хотя очень важным и неотъемлемым инструментом современного машиностроения. Нагрев обрабатываемого материала очень часто востребован среди арсенала технических средств механической обработки. Так, например, известно, что закалка не используется при обработке сплавов на основе вольфрама, как и поверхностное упрочнение, но для этого материала важнейшим этапом обработки является высокотемпературный отжиг, которому сплавы подвергаются для обеспечения возможности их дальнейшей обработки.

Плазменные устройства модификации поверхности

С конца XX в. в *Институте электрофизики и электроэнергетики РАН* (ИЭЭ РАН) ведутся разработки плазменной техники, сочетающие в себе комплекс уникальных характеристик [11, 12]. Генераторы плазмы переменного тока, создаваемые на протяжении нескольких десятилетий, показали высочайшую надежность, долговечность и эффективность. Круг применения электродуговых генераторов плазмы, разработанных в ИЭЭ РАН постоянно расширяется, не ограничиваясь распространенными сферами, связанными с уничтожением и переработкой отходов, газификацией углей, рифор-

мингом метана и другими природоохранными технологиями. Была реализована технология двухстадийной термической конверсии биомассы в синтез-газ, сочетающая пиролиз и высокотемпературный крекинг летучих соединений, позволяющая переходить к производству нового вида кондиционного твердого биотоплива из отходов. Это показывает, что применение генераторов плазмы для ввода энергии в процессах термической обработки крайне перспективно ввиду возможности создания высокоэнтальпийных потоков и среднемассовых температур до 2500 К.

В настоящий момент создан генератор плазмы [13], позволяющий использовать в качестве рабочего газа весь спектр газовых смесей от воздуха до водорода, достигая высоких технических характеристик по теплосодержанию плазмообразующего газа, долговечности конструкции и ресурсу работы. Следует обратить внимание, что для смешивания различных газов нет необходимости в отключении или переналадке устройства, что позволяет проводить широкий круг экспериментов без дополнительных затрат времени и ресурсов. Мощность генератора плазмы до 20 кВт, падение напряжения на дуге 200–2000 В (в зависимости от режима работы). Генератор плазмы состоит из следующих составных частей: водоохлаждаемого корпуса из нержавеющей стали, двух электродных каналов, сходящихся к соплу под углом 30°, подача рабочего газа осуществляется тангенциально из кольцевой канальной камеры. Проходной изолятор представляет собой конструкцию, сваренную из нержавеющей стали и имеющую водяное охлаждение и закрепленную снаружи втулкой-изолятором. Сменные электродные наконечники могут быть изготовлены из различных материалов, наиболее соответствующих выполняемым работам. На базе этого плазмотрона возможно создание технологической установки для напыления, модификации поверхности, очистки, закалки, отжига и т. д. Высокая эффективность и небольшие размеры позволяют использовать как стационарно, так и мобильно, например, для обработки части крупнотоннажной заготовки.

Список источников

1. Plasma-assisted synthesis and surface modification of electrode materials for renewable energy / D. Shuo [et al.] // Advanced materials. 2018. Vol. 30, is. 21. P. 1705850.

2. *Абдуллин И. Ш., Хубатхузин А. А., Башкирцев А. А.* Модификация поверхности материалов низкотемпературной плазмой // Плазменные технологии исследования, модификации и получения материалов различной физической природы: Междунар. науч. конф. / М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. Казань: Изд-во КНИТУ, 2012. С. 232–233.

3. *Арцимович Л. А.* Элементарная физика плазмы. М.: Атомиздат, 1969. 191 с.

4. Плазменное получение ультрадисперсных оксидов железа и алюминия / А. А. Сафронов [и др.] // Прикладная физика. 2021. № 3. С. 66–71.

5. The possibility of garbage, medical and other toxic waste treatment by plasma chemical method / Ph. G. Rutberg, A. A. Safronov, A. N. Bratsev, V. E. Kuznetsov // 25th Anniversary. IEEE conference record – abstracts. 1998 IEEE International conference on plasma science. 1998. P. 226.

6. Plasma technologies of solid and liquid toxic waste disinfection / P. G. Rutberg [et al.] // Digest of technical papers PPPS-2001 pulsed power plasma science – 2001. N. Y., 2001. P. 1178–1181.

7. *Liston E.* Plasma treatment for improved bonding: a review // The Journal of adhesion. 1989. Vol. 30, № 1–4. P. 199–218.

8. Исследование плазмотрона переменного тока для получения высокодисперсных порошков тугоплавких металлов / В. Е. Кузнецов [и др.] // Прикладная физика. 2022. № 2. С. 72–77.

9. *Ohkubo Y., Endo K., Yamamura K.* Adhesive-free adhesion between heat-assisted plasma-treated fluoropolymers (PTFE, PFA) and plasma-jet-treated polydimethylsiloxane (PDMS) and its application // Scientific reports. Materials science, engineering. 2018. Vol. 8. P. 18058.

10. *Бердников А. А., Алисова Г. В., Филиппов М. А.* Плазменная закалка сталей – технология машиностроения XXI в. // Урал индустриальный. Бакунинские чтения. Индустриальная модернизация Урала в XVIII–XXI вв.: Материалы XI Всерос. науч. конф. (Екатеринбург, 26–27 сент. 2013 г.). Т. 2. Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2013. С. 21–26.

11. *Глебов И. А., Рутберг Ф. Г.* Мощные генераторы плазмы. М: Энергоатомиздат, 1985. 153 с.

12. Трехфазные плазмотроны переменного тока и их применение / Ф. Г. Рутберг, А. А. Сафронов, В. Н. Ширяев, В. Е. Кузнецов // Физика низкотемпературной плазмы ФНТП – 98: Материалы конф. по физике низкотемпературной плазмы ФНТП – 98: в 2 ч. Ч. 2. 1998. С. 578–581.

13. Плазмотроны переменного тока. Системы инициирования дуги. Особенности конструкции и применения / А. А. Сафронов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 2. С. 58–66.

УДК 621.313.14 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1916-0-2024-19-315-320**

Л. И. Чубраева*
доктор технических наук, член-корреспондент РАН
** Институт электрофизики и электроэнергетики РАН*

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА

Рассмотрены вопросы создания автономных энергетических установок для беспилотных объектов, основанных на водородной энергетике и высокочистых металлах. Необходимые для работы топливных элементов водород и кислород запасаются в виде жидких газов и используются для функционирования криогенного униполярного двигателя и, при необходимости, индуктивного накопителя энергии. Последние за счет потерь нагревают эти газы до рабочей температуры. Вода, образующаяся в процессе работы батареи топливных элементов, используется для охлаждения щеточно-контактного аппарата униполярного двигателя, являющегося приводом гребного винта.
Ключевые слова: *беспилотный аппарат, энергетические установки, топливные элементы, криогенный униполярный двигатель, индуктивный накопитель, высокочистые металлы.*

L. I. Chubraeva *
Dr. Sc., Tech., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences
** Institute of Electrophysics and Electric Power Engineering RAS*

ELECTRIC POWER PLANT FOR INDEPENDENT UNMANNED FACILITY

The article deals with the scientific bases of energy power plant development intended for the independent unmanned facility based on hydrogen energy and high-purity metals. It reveals a possibility of increasing the efficiency of the propeller homopolar motor and energy storage unit, if necessary, by introducing cryogenically cooled windings manufactured of high-purity metals. The windings are cooled by liquid hydrogen and oxygen stored on board the object. The liquids are the integral elements of a battery of solid-polymer fuel cells functioning. The motor and the storage unite serve simultaneously the cryogenic liquids heaters. The water generated by fuel-cells is used to cool the brush contacts of the homopolar drive motor.
Keywords: *unmanned drone, power plant, fuel cells, homopolar cryogenic motor, inductive storage, high-purity metals.*

Любой беспилотный объект содержит среди обязательных элементов электроэнергетическую установку. Наиболее безопасным источником электрической энергии на таком аппарате в настоящее время считается батарея из топливных элементов с твердотельным полимерным электролитом. Двигатель, входящий в электроэнергетическую установку, должен удовлетворять ряду требований: простота регулирования частоты вращения, малая масса, высокий коэффициент полезного действия (КПД), надежность. Кроме того, следует принимать во внимание, что топливные элементы являются низковольтными устройствами постоянного тока. В этих условиях предпочтение следует отдать униполярному двигателю, который является низковольтным двигателем постоянного тока, имеет простую систему управления и служит приводом гребного винта.

Водород и кислород, необходимые для работы топливных элементов, запасаются как сжиженные газы. Они занимают меньший объем, чем водород и кислород под давлением. Жидкий водород имеет температуру 20,4 К, а жидкий кислород – 90 К. В этом случае общая схема электроэнергетической установки имеет вид, показанный на рис. 1.

Обычно после криогенных насосов в существующих схемах устанавливаются нагреватели сжиженных газов. На подводном объекте сравнительно небольшого размера целесообразно использовать привод гребного винта и индуктивный накопитель энергии в качестве этих нагревателей. Двигатель постоянного тока, работающий как нагреватель жидкого водорода, может иметь как сверхпроводниковую обмотку возбуждения, так и обмотку возбуждения из высокочистого металла. Это определяется на основе электромагнитных и теплофизических расчетов. При этом следует учитывать, что обмотка индуктора из высокочистого алюминия будет иметь существенно меньшую мас-

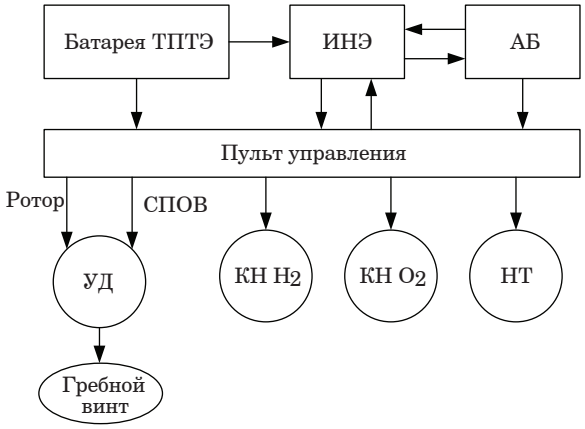


Рис. 1. Общая схема автономной электроэнергетической установки с твердополимерными топливными элементами: ИНЭ – индуктивный накопитель энергии из высокочистых металлов; АБ – аккумуляторная батарея; УД – униполярный двигатель; СПОВ – сверхпроводниковая обмотка возбуждения; КНO_2 – криогенный насос O_2; КНH_2 – криогенный насос H_2; НТ – насос для теплообменника, охлаждающего воду к униполярному двигателю

су. Кроме того, в отличие от сверхпроводников, которые скачком переходят в сверхпроводящее состояние при достижении критической температуры, гиперпроводники позволяют подбирать необходимую для рабочего режима, включающего и нагрев жидкого водорода, оптимальную плотность тока. Индуктивный накопитель энергии нагревает жидкий кислород. В настоящий момент нет сверхпроводников, которые могут устойчиво работать при 90 К, поэтому для него предпочтительны обмотки из высокочистых металлов. В процессе работы топливных элементов образуется вода (рис. 2). Она может быть использована для повышения эффективности работы щеточного аппарата униполярного двигателя.

Такие исследования проводились на этапе низкотемпературной сверхпроводимости в 80-е гг. прошлого века.

На рис. 3 показан ротор модельного униполярного двигателя мощностью 120 кВт при под-

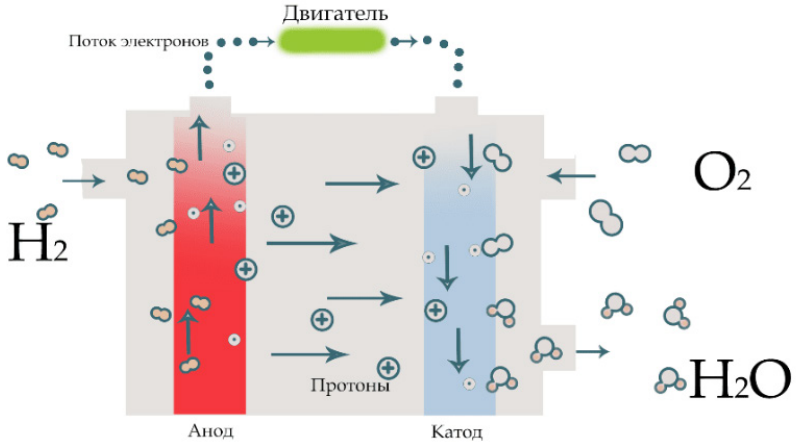


Рис. 2. Принципиальная схема работы топливного элемента [1]

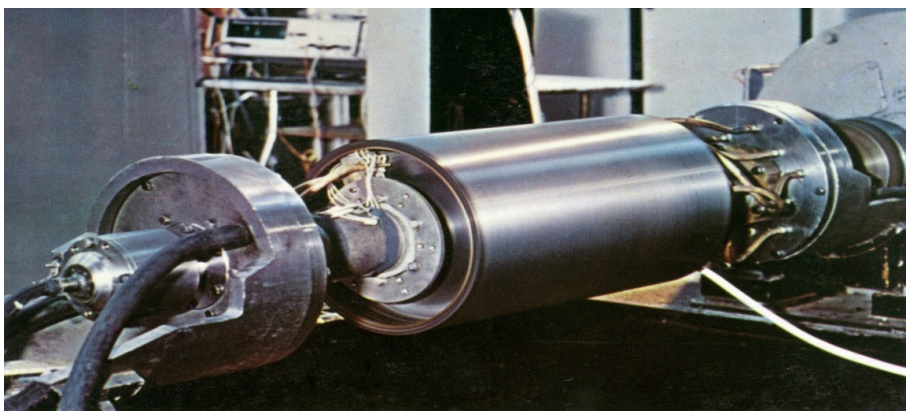


Рис. 3. Подготовка к испытаниям ротора криогенного униполярного двигателя

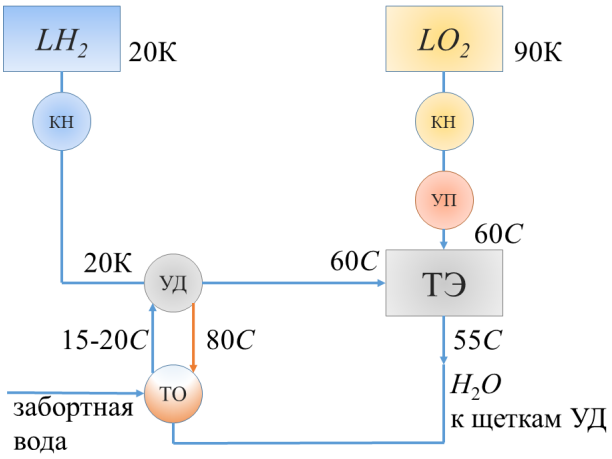


Рис. 4. Схема установки с твердотельным топливным элементом (ТЭ), униполярным двигателем (УД), запасом криогенных жидкостей H_2 и O_2 для работы ТЭ, криогенными насосами (КН), узлом подогрева жидкого азота (УП) и системой водяного охлаждения щеток униполярного двигателя

готовке испытаний щеток с водяным охлаждением.

На рис. 4 показана подробная схема рассматриваемой автономной энергетической установки.

Ниже приводится анализ перспектив применения высокочистых металлов для обмоток униполярного двигателя и накопителя энергии.

Рассмотрим возможность применения высокочистых металлов для обмоток криогенных электротехнических устройств. По правилу Матиссена, удельное электрическое сопротивление металла, не являющегося ни полупроводником, ни сверхпроводником, состоит из двух теоретически независимых слагаемых: идеального удельного сопротивления ρ_i, которое уменьшается с понижением температуры и зависит только от природы металла, и остаточного удельного сопротивления, не изменяющегося с температурой, но зависящего от примесей и физических дефектов в металле. Таким образом, для существенного снижения удельного электрического сопротивления необходимо сочетание низкой температуры и идеального отожженного металла высокой чистоты.

Наибольший интерес из криорезистивных проводов представляют собой чистые алюминий и бериллий, отличающиеся малыми удельными массами [3]. Для оценки температур, при которых экономически эффективно использование криорезистивных обмоточных проводов вместо медных при комнатной температуре, может быть использован параметр W, зависящий от криогенной температуры T, удельного сопротивления $\rho_T+\Delta_T$, где Δ_T – перепад температуры между хладагентом и проводником, электрических потерь и криогенных потерь. Результаты расчетов позволяют получить характер изменения параметра W в зависимости от температуры для обмоток из алюминия, бериллия и меди (рис. 5).

Параметр W уменьшается до величин ниже 100 % для бериллия при температуре 200 К, для алюминия – при 80 К. Затем кривые проходят через минимум 60–80 К для бериллия и 20 К для алюминия, откуда следует, что обмотки из бериллия должны охлаждаться жидким азотом, но использование жидкого кислорода также допустимо, а обмотки из алюминия – жидким водородом и неоном или газообразным гелием.

Удельное электрическое сопротивление массивного образца из чистого алюминия 99,999 % при температуре 20 К равно $4{\cdot}10^{-11}$ Ом·м, а у чистого бериллия – 99,99 % при температуре 77 К – $4{,}8{\cdot}10^{-10}$ Ом·м. (При температуре жидкого азота удельное электрическое сопротивление сверхчистых меди, серебра, алюминия составляет, соответственно, $19{,}6{\cdot}10^{-10}$; $27{,}9{\cdot}10^{-10}$ и $22{,}4{\cdot}10^{-10}$ Ом·м).

На электрическое сопротивление чистых металлов отрицательное влияние оказывает магнитное поле, а при очень малых диаметрах проводов, в дополнение к этому еще и так называемый размерный эффект.

Наличие магнитных полей в чистых металлах при криогенных температурах приводит

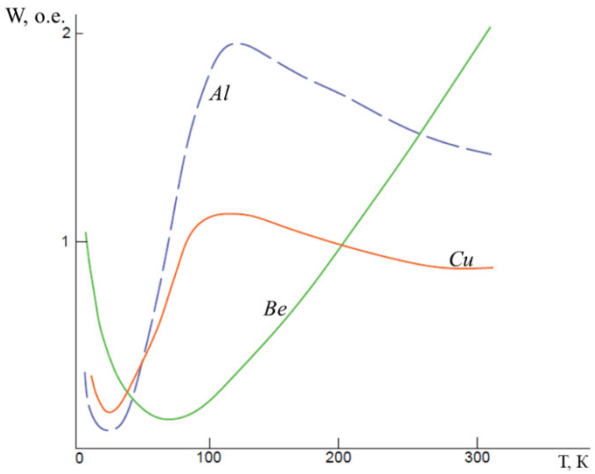


Рис. 5. Энергетическая эффективность для высокочистых Al (алюминия), Be (бериллия), Cu (меди) в зависимости от температуры

к эффекту магнитосопротивления, в результате которого появляется добавочное сопротивление, учитываемое коэффициентом

$$k_m = \rho_m + \frac{\Delta\rho_m}{\rho_m},$$

где ρ_m – удельное сопротивление массивного образца при криогенной температуре; $\Delta\rho_m$ – магнитное удельное сопротивление.

Магниторезистивный эффект связан с тем, что магнитное поле искривляет траектории движения электронов и увеличивает сопротивление чистого металла. По правилу Юсти – Колера, увеличение удельного электрического сопротивления $\Delta\rho$ под влиянием магнитного поля тем больше, чем меньше ρ_m, т. е. чем выше чистота металла и чем ниже температура, при которой он работает. Удельное электрическое сопротивление бериллия изменяется в полном соответствии с этим законом, удельное электрическое сопротивление алюминия удовлетворяет этому правилу только приближенно. Поэтому оценка влияния магнитного поля на проводники из высокочистых металлов должна исследоваться экспериментально.

Размерный эффект проявляется в очень чистых металлах в том случае, если длина свободного пробега электронов при низких температурах оказывается соизмеримой или даже превышает размеры провода. В этом случае к объемным процессам релаксации присоединяется рассеяние носителей на поверхности образца.

Средний свободный пробег электрона составляет для чистого алюминия от 10 мкм при 20 К до 20 мкм при 4 К. Для очень чистого бериллия длина свободного пробега электронов при 77 К составляет 45,3 мкм.

Наличие размерного эффекта делает нецелесообразным использование бериллия чистотой выше 99,99 %, так как для него уменьшение диаметра провода от 2,2 до 0,14 мм приводит к увеличению удельного электрического сопротивления от $4{,}8\cdot10^{-10}$ до $6{,}2\cdot10^{-10}$ Ом·м при 77 К (магнитное поле отсутствует).

В 80–90-е гг. прошлого века в нашей стране достигнуты хорошие результаты в создании обмоточных проводов из чистых алюминия и бериллия. Разработана технология изготовления многожильных кабелей, имеющих диаметр элементарных проводников до 0,1 мм (с оксидированной изоляцией). Получены обмоточные материалы в виде длинномерной бериллиевой проволоки диаметром до 0,09 мм и ленты размером $0{,}1\times1{,}3$ мм^2.

Большим недостатком проводников из чистых металлов является их низкая механическая прочность. Правда, при криогенных температурах она увеличивается. Так, например, предел упругости чистого алюминия при криогенных температурах повышается в 3 раза, а предел текучести – в 1,6 раза.

Что касается токсичности бериллия, то это свойство проявляется, при проникновении его в организм через дыхательные пути, т. е. когда он предварительно распылен. Такие условия могут встречаться в порошковой металлургии или при механической обработке. При этом должны выполняться требования, диктуемые санитарными нормами. Обмоточные изделия из бериллия нетоксичны, поскольку процесс его распыления при изготовлении обмотки отсутствует. Однако, несмотря на указанные трудности, чистые алюминий и бериллий представляют несомненный интерес для применения в обмотках электрических машин.

Очевидно, что для повышения прочности обмоточных криорезистивных материалов необходимо разрабатывать новые технологии, аналогичные применяемым в настоящее время при производстве многожильных сверхпроводящих композитов. В этом случае твистированные с определенным шагом тонкие нити чистого металла должны располагаться в матрице из металла с хорошей теплопроводностью и механической прочностью, причем ее электропроводность должна быть ниже, чем у нитей. Так, например, в обмотках из чистого алюминия, работающих в магнитных полях, индукция которых превышает 4 Тл, матрица может быть выполнена из чистой меди, поскольку ее удельное электрическое сопротивление монотонно увеличивается при повышении индукции и опережает рост сопротивления чистого алюминия, достигающего насыщения при 2 Тл. Удельная плотность такого провода при $к_з = 0{,}5$ составляет 5,8 т/м^3, что на 35 % меньше, чем у медного провода. Для обмоток, работающих в магнитных полях меньшей интенсивности, должны быть выбраны другие материалы. При этом в обмотках, предназначенных для переменных магнитных полей, нити чистого металла должны быть окружены высокоомным резистивным барьером, препятствующим перетеканию тока из нитей в матрицу.

Как уже говорилось выше, чистый бериллий выгодно отличается от чистого алюминия своим более низким удельным сопротивлением при температуре 77 К, равным $6{,}2\cdot10^{-10}$ Ом·м. Это почти в 30 раз меньше удельного сопротивления меди при температуре 75 °С.

Однако в отличие от алюминия чистый бериллий имеет значительное магнитосопротив-

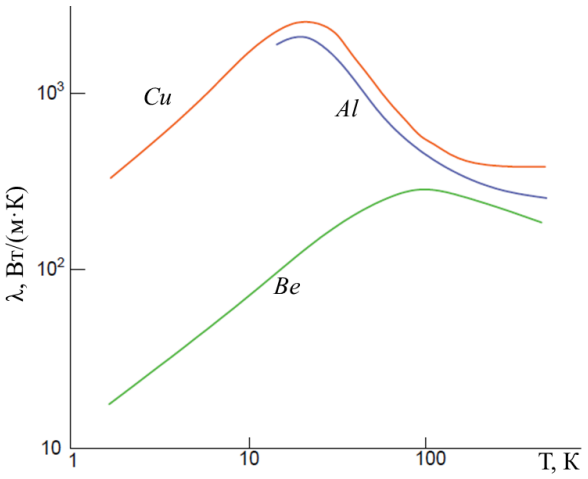


Рис. 6. Температурная зависимость удельной теплопроводности высокочистых меди (Cu), алюминия (Al) и бериллия (Be)

ление при 77 К, особенно при повышенных индукциях магнитного поля. Реальное поведение обмоток из высокочистого бериллия в магнитном поле требует уточнения.

Изменение теплопроводности высокочистых металлов в зависимости от температуры показано на рис. 6. Удельная теплоемкость бериллия – 1.72 Дж/г·К; в сочетании с малой удельной плотностью и хорошей удельной теплопроводностью это обеспечивает ему высокую (среди металлов) способность к теплопередаче. Теплопроводность чистого бериллия максимальная при температурах около 100 К (рис. 6), внешнее магнитное поле не оказывает на нее существенного влияния. У чистого алюминия максимум теплопроводности соответствует температуре жидкого водорода, при этом влияние магнитного поля сказывается сильнее, чем у бериллия. Удельная теплопроводность алюминия при криогенных температурах в несколько раз выше, чем при комнатной температуре, что создает благоприятные условия для повышения плотности тока.

Другим благоприятным моментом, связанным с обеспечением высокой надежности электрической изоляции, является исключительно высокая электрическая прочность твердых диэлектриков при криогенных температурах, а также отсутствие старения высоковольтной электрической изоляции при криогенных температурах.

Таким образом, применение криогенных жидкостей для охлаждения обмоток из чистых металлов позволяет в определенной упростить конструктивную схему изоляции и повысить надежность.

Больших успехов в создании композитных проводов из высокочистых металлов добились специалисты США и Российской Федерации (РФ). Это работы фирмы «Вестингауз» (США) в производстве механически прочных обмоточных проводов из чистого алюминия. Тонкие жилы чистого алюминия (99,999) располагались в матрице, содержащей 88 % алюминия, 4 % церия и 8 % железа. Провода выпускались двух модификаций: без резистивного барьера вокруг нитей из чистого алюминия и с резистивным барьером. Плотность тока в таких проводниках составляет 250 А/мм^2 по сечению алюминиевых нитей и 125 А/мм^2 по сечению провода. Потери на переменном токе в таком криопроводнике находятся на одном уровне со сверхпроводниками, предназначенными для работы в переменных магнитных полях.

Однако наилучшие результаты получены в РФ [4]. Совместно с акционерным обществом «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. А. А. Бочвара» была разработана технология производства композитных проводов из высокочистого алюминия в медной матрице для применения на постоянном и переменном токах (рис. 7). Эту технологию никому не удалось повторить.

Были изготовлены и испытаны опытные стержни обмотки статора для высокооборотного генератора из провода диаметром 0,3 мм, содержащего 49 твистированных нитей высокочистого алюминия в медной матрице. Из-за ограниченной длины проводов на первом этапе их производства транспонированные стержни пришлось плести вручную (рис. 8).

Испытания стержней при температуре жидкого водорода (20 К) показали возможность получения средней плотности тока по сечению стержней до 200–250 А/мм^2 на переменном токе частотой 400 Гц [4]. На постоянном токе эта плотность тока может быть повышена до 300–350 А/мм^2.

Приведенные результаты показывают, что имеется хорошая научная и технологическая база для использования высокочистых металлов при изготовлении обмоток униполярного двигателя и индуктивного накопителя энергии как элементов электроэнергетической установки для беспилотного автономного объекта.

Н основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Предложена оригинальная автономная электроэнергетическая система постоянного тока, содержащая батарею твердотополимерных топливных элементов, криогенный греб-

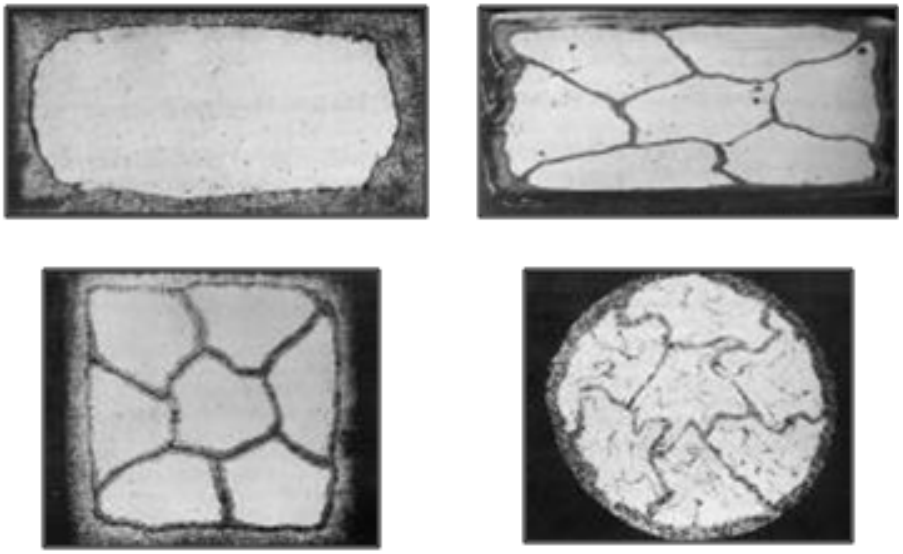


Рис. 7. Поперечное сечение проводов из высокочистого алюминия в медной матрице

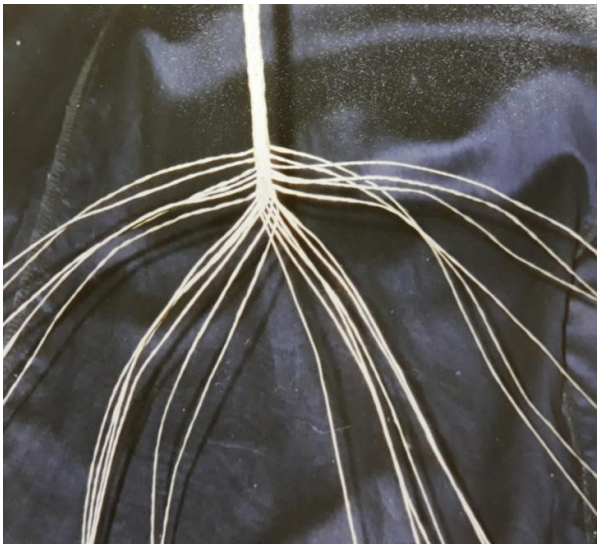


Рис. 8. Плетение транспонированного стержня из композитного высокочистого алюминия (провод в электрической изоляции)

ной униполярный двигатель и криогенный индуктивный накопитель энергии. Обмотка возбуждения униполярного двигателя может быть изготовлена как из высокотемпературных сверхпроводников, так и из высокочистого алюминия, обмотка накопителя энергии – из высокочистого бериллия.

2. Рассмотрены свойства гиперпроводников, которые обеспечивают повышение эффективности гребного электродвигателя и накопителя энергии. Показано, что обмотка возбуждения униполярного двигателя из высокочистого алюминия может работать при температуре жидкого водорода, а обмотка индуктивного накопителя энергии – при температуре жидкого кислорода. Обе служат одновременно нагревателями сжиженных газов до рабочей температуры топливного элемента.

3. Показана возможность повышения эффективности гребного униполярного двигателя за счет использования для охлаждения щеточного аппарата воды, образующейся в процессе работы батареи твердополимерных топливных элементов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Список источников

1. *Новицкий В. Г.* Исследование высоконагруженного скользящего токосъема // Сверхпроводниковые электрические машины. Л.: ВНИИЭлектромаш, 1986.

2. *Сайданов В. О., Ландграф И. К., Савченко О. В.* Электрохимические энергетические установки для объектов вооруженных сил Российской Федерации. СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2022. 260 с.

3. *Чубраева Л. И.* Генераторы нетрадиционного исполнения. Л.: Наука, Ленинград. отд-е, 1991. 246 с.

4. Development and investigation of composite high-purity aluminum wires / L. I. Chubraeva [et al.] // Advances in cryogenic engineering. 1997. P. 6.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Антонов Михаил Александрович
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – синтез САУ на основе технического зрения.
E-mail: missa11133@mail.ru

Афанасьева Александра Валентиновна
Старший преподаватель кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – стеганография, кодовые методы, распределенные протоколы.
SPIN-код: 6826-1553
E-mail: alra@k36.org

Бадика Егор Максимович
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – робототехника, автоматизация, цифровые двойники, теория автоматического управления.
E-mail: embadika@gmail.com

Бардовский Алексей Александрович
Аспирант.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, информационные системы.
E-mail: bardovski.alesha@mail.ru

Безгодов Алексей Арнольдович
Кандидат военных наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
E-mail: 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.
SPIN-код: 9199-0258
E-mail: bsv@aanet.ru

Бобрышов Алексей Павлович
Аспирант, ассистент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – мехатроника и робототехника, искусственный интеллект, автоматизация, цифровые технологии, машинное обучение, компьютерное зрение, электроснабжение, электроэнергетика, электромеханика, качество электрической энергии.
SPIN-код: 2630-5787
E-mail: ap.bobryshov@mail.ru

Бойков Владимир Иванович
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системный анализ, автоматическое управление.
SPIN-код: 4258-7486
E-mail: viboikov@mail.ru

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.
E-mail: 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.
SPIN-код: 4173-0539
E-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru

Бушуев Александр Борисович
Кандидат технических наук, старший преподаватель.
Факультет систем управления и робототехники, Национальный исследовательский университет ИТМО.
Область научных интересов – разработка физического принципа действия технических систем.
SPIN-код: 7413-8698
E-mail: bushuev@inbox.ru

Быстров Сергей Владимирович
Кандидат технических наук, доцент.
Национальный исследовательский университет ИТМО.
Область научных интересов – элементы систем управления, автоматическое управление.
SPIN-код: 8247-1770
E-mail: sbystrov@mail.ru

Васильева Дина Владимировна
Старший преподаватель кафедры биотехнических систем и технологий.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – цифровая обработка сигналов.
SPIN-код: 4166-7299
E-mail: dolli.dina@mail.ru

Васильева Ольга Борисовна
Научный сотрудник.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Область научных интересов – низкотемпературная плазма, плазмохимические установки, ультрадисперсные материалы.
SPIN-код: 7691-1515
E-mail: rc@iperas.nw.ru

Ватаева Елизавета Юрьевна
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – синтез нелинейных систем автоматического управления, оптимизация систем управления.
SPIN-код: 2234-6792
E-mail: elizavetavataeva@mail.ru

Вдовин Максим Вячеславович
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Область научных интересов – информационная безопасность.
E-mail: maxpostupaet@gmail.com

Величко Иван Сергеевич
Ассистент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, криптография.
SPIN-код: 8198-0531
E-mail: wwr0gnn4m3@yandex.ru

Гайдук Олег Дмитриевич
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность.
E-mail: gajduk.o@inbox.ru

Геклер Елена Алексеевна
Главный конструктор.
АО «Научно-промышленный центр „Силовые электротехнические системы"».
Область научных интересов – преобразовательная техника, электрические машины переменного тока, математическое моделирование физических систем.
E-mail: glekler@p-drive.ru

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.
E-mail: viktor-golubkov@yandex.ru

Голованов Андрей Андреевич
Ассистент.
Национальный исследовательский университет ИТМО.
Область научных интересов — криптография, постквантовая криптография.
SPIN-код: 8773-1593
E-mail: agolovanov2403@gmail.com

Гончарова Виктория Игоревна
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – нелинейные системы автоматического управления.
SPIN-код: 3514-5660
E-mail: goncharova_31kaf@bk.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.
SPIN-код: 7170-8166
E-mail: space.suai@bk.ru

Грузденков Григорий Андреевич
Студент.
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.
E-mail: grzdnkv@gmail.com

Давыдов Вадим Валерьевич
Кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов — математические основы криптографии, постквантовая криптография.
SPIN-код: 4017-8775
E-mail: vadimdavydov@outlook.com

Дакуо Жан-Мишель Никодэмович
Ассистент.
Национальный исследовательский университет ИТМО.
Область научных интересов – криптография, постквантовая криптография, криптография на изогениях.
E-mail: jeandakuo@mail.ru

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.
SPIN-код: 7109-9590
E-mail: practicdsv@yandex.ru

Дудник Юлия Дмитриевна
Научный сотрудник.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Область научных интересов – низкотемпературная плазма, плазмохимические установки, ультрадисперсные материалы.
SPIN-код: 7170-7912
E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru

Дьяконов Александр Андреевич
Преподаватель кафедры автоматизированного электропривода, электромеханики и электротехники.
Оренбургский государственный университет.
Область научных интересов – интеллектуальная электроэнергетика.
E-mail: a.dyakonov@okes.ru

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.
SPIN-код: 1442-6767
E-mail: elinatn@yandex.ru

Елтышева Ирина Владимировна
Старший преподаватель кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование систем, информационная безопасность.
E-mail: eltiv1@yandex.ru

Ерышов Вадим Георгиевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность.
E-mail: eryshov@mail.ru

Зырянов Дмитрий Александрович
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – робототехника, автоматизация, цифровые двойники, теория автоматического управления.
E-mail: zyrikdima@gmail.com

Камышева Людмила Валерьевна
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – мехатроника и робототехника.
E-mail: sobol-lyudmila@mail.ru

Кантюков Никита Русланович
Аспирант кафедры электротехники и электрооборудования предприятий.
Уфимский государственный нефтяной технический университет.
Область научных интересов – функциональная интеграция электромагнитных элементов.
SPIN-код: 1138-5333
E-mail: kantyukov1998@mail.ru

Карапугина Диана Владимировна
Студенты кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, информационные системы.
E-mail: dkaragugina@gmail.com

Клинов Ярослав Викторович
Студент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование систем автоматического управления, электрический привод, электрические машины.
E-mail: klinov.yaroslav@mail.ru

Коломойцев Владимир Сергеевич
Кандидат технических наук, доцент.
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.
SPIN-код: 4162-4803
E-mail: Dekoros@guap.ru

Корсакова Юлия Дмитриевна
Студент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность.
E-mail: korsakova1505@gmail.com

Косулин Владимир Дмитриевич
Кандидат технических наук, доцент.
Область научных интересов – вентильные электродвигатели постоянного тока.
E-mail: vdk.spb@mail.ru

Красников Никита Сергеевич
Ассистент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, машинное обучение, математическое моделирование.
E-mail: nik.kras.asp@mail.ru

Криволапчук Игорь Григорьевич
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – авиационные тренажеры, системы управления.
E-mail: ing@aanet.ru

Кузенов Виктор Витальевич
Доктор физико-математических наук, доцент, профессор.
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана.
Область научных интересов – плазменные разряды, радиационная магнитно-газовая динамика, математическое моделирование, физика плазмы.
SPIN-код: 1043-7341
E-mail: vik.kuzenov@gmail.com

Кузнецов Владимир Евгеньевич
Кандидат технических наук, заведующий лабораторией.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Область научных интересов – низкотемпературная плазма, плазмохимические установки, ультрадисперсные материалы.
SPIN-код: 7433-5020
E-mail: rc@iperas.nw.ru

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.
SPIN-код: 3159-4202
E-mail: mr.konnny@gmail.com

Лач Сергей Юрьевич
Ассистент кафедры электромеханики и робототехники, заведующий лабораторией СКБ «Силовые машины – ГУАП» Инженерной школы ГУАП.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроэнергетика и электротехника, робототехника и мехатроника.
SPIN-код: 8086-3522
E-mail: Serzh.lach@mail.ru

Лебедев Игорь Сергеевич
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – микроконтроллеры, схемотехника, электротехника, электродинамика, радиотехника, физика колебаний и волн, реверс-инжиниринг, разработки в области аддитивных технологий.
E-mail: igor_lebedev2000@mail.ru

Литвинов Юрий Володарович
Кандидат технических наук, доцент кафедры управление в технических системах.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – управление подвижными объектами.
SPIN-код: 9363-6676
E-mail: yurl13@yandex.ru

Ляшенко Александр Леонидович
Кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы с распределенными параметрами.
SPIN-код: 5164-1987
E-mail: akuna_matata_kmv@mail.ru

Манин Михаил Яковлевич
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – специальные электромеханические системы.
E-mail: m4ninmihail@yandex.ru
m4ninmihail@yandex.ru

Мартынов Александр Александрович
Кандидат технических наук, доцент кафедры технической физики, электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электромеханика: электрические машины и полупроводниковая преобразовательная техника.
E-mail: martynov41@mail.ru

Мельников Сергей Юрьевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электротехника.
SPIN-код: 9818-8112
E-mail: sburime@mail.ru

Монахов Максим Александрович
Студент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы автоматического управления, моделирование систем, электромеханические системы.
E-mail: angelestron15@mail.ru

Морева Светлана Леонидовна
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы с распределенными параметрами.
SPIN-код: 1378-8113
E-mail: sweetmoreva@yandex.ru

Морозов Александр Борисович
Аспирант.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – робототехника.
SPIN-код: 6297-8220
E-mail: alex.moroz415@gmail.com

Мохомет Алина Дмитриевна
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – современные методы обнаружения гололеда на проводах воздушных линий электропередачи.
E-mail: Proect_73@icloud.com

Мухаметшин Андрей Валерьевич
Доцент базовой кафедры электроэнергетики и электротехнологий в составе кафедры электротехники и электрооборудования предприятий.
Уфимский государственный нефтяной технический университет.
Область научных интересов – высоковольтные испытательные установки.
SPIN-код: 4200-6564
E-mail: mukhametshinav@yandex.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.
SPIN-код: 1211-5328
va.mylnikov@yandex.ru

Никитина Катерина Сергеевна
Студент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование систем автоматического управления.
E-mail: katerina_2404@inbox.ru

Нуйя Ольга Святославовна
Кандидат технических наук, доцент кафедры управление в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы дистанционного управление в технических объектах.
SPIN-код: 9548-3759
E-mail: olga.nuyya@yandex.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.
E-mail: arkadipan@mail.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.
E-mail: tg-p@mail.ru

Полянский Артем Георгиевич
Аспирант кафедры теплофизики.
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана.
Область научных интересов – магнитоплазмодинамические процессы, электроразрядные источники, лазеры, комбинированные схемы.
SPIN-код: 9208-5423
E-mail: artgpol@mail.ru

Попов Артём Константинович
Магистрант кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – микроэлектроника, микроконтроллеры, реверс-инжиниринг.
E-mail: comidj@slsrs.ru

Прокофьева Мария Константиновна
Аспирант, начальник конструкторского отдела.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
ООО «Рантэк-С».
Область научных интересов – роботы, мехатроника, робототехнические системы.
E-mail: prokofevamk@yandex.ru

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.
SPIN-код: 9704-0264
E-mail: kaf31@guap.ru

Романова Марина Сергеевна
Старший преподаватель кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроснабжение, автоматизация процессов, жизненный цикл продукции.
SPIN-код: 8961-0380
E-mail: marina.2108@mail.ru

Рулёв Андрей Михайлович
Магистрант кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – теория автоматического управления, нелинейные системы, электропривод.
E-mail: andreyrul84@gmail.com

Рындюк Виктория Александровна
Кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность.
SPIN-код: 1001-8494
E-mail: 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.
E-mail: salova_irine@mail.ru

Сафронов Алексей Анатольевич
Доктор технических наук, заведующий отделением.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Область научных интересов – низкотемпературная плазма, плазмохимические установки, ультрадисперсные материалы.
SPIN-код: 5771-1927
E-mail: rc@iperas.nw.ru

Семенова Наталья Геннадьевна
Доктор педагогических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры автоматизированного электропривода, электромеханики и электротехники.
Оренбургский государственный университет.
Область научных интересов – интеллектуальная электроэнергетика.
SPIN-код: 3072-2630
E-mail: ng_sem@mail.ru

Сергеев Артём Сергеевич
Заместитель начальника отдела информационной безопасности.
ООО «Ачим Девелопмент».
Область научных интересов – информационная безопасность киберфизических систем.
SPIN-код: 1888-3307
E-mail: mircsk@mail.ru

Сергеев Павел Андреевич
Аспирант, заведующий лабораторией промышленной электроники Инженерной школы ГУАП.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроника, микроэлектроника, робототехника, технологическое предпринимательство, искусственный интеллект, организация производства, интернет вещей, искусственный интеллект.
SPIN-код: 9348-1560
E-mail: Pas7@bk.ru

Сержантова Майя Вячеславовна
Кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы автоматического управления техническими объектами.
SPIN-код: 1109-2272
E-mail: 12noch@mail.ru

Смолянинов Даниил Дмитриевич
Магистрант.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы автоматического управления, силовой электропривод.
E-mail: daniil511@yandex.ru

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.
SPIN-код: 4270-3622
E-mail: osolenaya@guap.ru

Солёный Сергей Валентинович
Кандидат технических наук, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники, директор Инженерной школы ГУАП.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроэнергетика, электромеханика, автоматизация, робототехника, информационная безопасность, технологическое предпринимательство, искусственный интеллект.
SPIN-код: 3957-5891
E-mail: ssv555ssv@yandex.ru

Софронов Александр Андреевич
Магистр, инженер 3-й категории.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
АО «Научно-промышленный центр „Силовые электротехнические системы"».
Область научных интересов – электромеханика, силовая преобразовательная техника.
E-mail: sofronovalexx21@gmail.com

Тимофеев Сергей Сергеевич
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электропривод, электрические машины, системы управления, сверхпроводимость, постоянные магниты, двигатели постоянного тока, синхронные двигатели.
SPIN-код: 5413-4038
E-mail: Sergio121@yandex.ru

Тимощук Андрей Васильевич
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – имитационное моделирование, автоматизация, техническое зрение.
E-mail: atim8123@gmail.com

Третьяков Никита Константинович
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроэнергетика, силовая электроника.
E-mail: Nt7836655@yandex.ru

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.
E-mail: 12051312@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.
SPIN-код: 6523-8397
E-mail: levikha@rambler.ru

Хазиева Регина Тагировна
Кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования предприятий.
Уфимский государственный нефтяной технический университет.
Область научных интересов – функциональная интеграция электромагнитных элементов.
SPIN-код: 8800-6132
E-mail: khazievart@mail.ru

Хуцаева Алтана Феликсовна
Инженер.
Национальный исследовательский университет ИТМО.
Область научных интересов – постквантовая криптография, криптография на изогениях эллиптических кривых.
E-mail: afkhutsaeva@itmo.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.
SPIN-код: 9712-8318
E-mail: olgchern@mail.ru

Чубраева Лидия Игоревна
Доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заведующая лабораторией электроэнергетики ИЭЭ РАН, главный научный сотрудник ИХС РАН.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
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.
SPIN-код: 5008-9622
E-mail: lidiach@mail.ru

Швецов Данила Сергеевич
Студент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы автоматического управления, моделирование систем, электромеханические системы.
E-mail: d.shvecov02@mail.ru

Шевкун Олег Александрович
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – роботизированные системы, искусственный интеллект, машинное обучение.
E-mail: o.shev.russia@gmail.com

Ширяев Василий Николаевич
Старший научный сотрудник.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Область научных интересов – низкотемпературная плазма, плазмохимические установки, ультрадисперсные материалы.
SPIN-код: 6728-5133
E-mail: rc@iperas.nw.ru

Шишков Илья Алексеевич
Студент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы автоматического управления техническими объектами, электрический привод.
E-mail: ilya0407android@gmail.com

Шишлаков Владислав Фёдорович
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.
SPIN-код: 3398-3859
E-mail: shishlakov@guap.ru

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.
E-mail: Fleitahd@gmail.com

Шорохов Семён Константинович
Студент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование систем автоматического управления, электрический привод, электрические машины.
E-mail: shorohov.semen@yandex.ru

Якимовский Дмитрий Олегович
Кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отделения.
Научно-исследовательский институт командных приборов.
Область научных интересов – прецизионное приборостроение.
E-mail: yakimovsky@yandex.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Афанасьева А. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ПОСТРОЕНИЮ АНТИКОАЛИЦИОННЫХ КОДОВ 3

Бардовский А. А. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ОБЛАСТИ IIOT 9

Беззатеев С. В., Сергеев А. С. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ 13

Бурлин Р. Г., Беззатеев С. В. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОТКРЫТЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАНТОВОГО ПРОТОКОЛА BB84 18

Буслаев Д. Р., Коломойцев В. С. РЕШЕНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СИСТЕМ ПОИСКА УЯЗВИМОСТЕЙ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ 22

Вдовин М. В., Рындюк В. А. АКТУАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ SIEM-СИСТЕМ 26

Величко И. С., Беззатеев С. В., Афанасьева А. В. РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ПРОТОКОЛ ГЕНЕРАЦИИ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА VRF 31

Грузденков Г. А., Коломойцев В. С. МЕТОДЫ БЕЗОПАСНОГО РАЗГРАНИЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ЧАСТИЧНОГО ДОСТУПА 34

Дворников С. В., Васильева Д. В. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ВЫБОРУ ВИДА ВЕЙВЛЕТА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ВЕКТОРОВ ПРИЗНАКОВ ИЗ КРАТНОМАСШТАБНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ 38

Ерышов В. Г., Гайдук О. Д. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПРИЗНАКОВЫХ ВЕКТОРОВ ПРИ ВИРУСНОМ АНАЛИЗЕ НА БАЗЕ АБСТРАКТНОГО СИНТАКСИЧЕСКОГО ДЕРЕВА 43

Жиданов К. А. ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ КРОССЧЕЙН-ОПЕРАЦИЙ 47

Корсакова Ю. Д., Коломойцев В. С. К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ USB-КЛЮЧЕЙ КАК СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА 50

Красников Н. С., Елина Т. Н. АНАЛИЗ ПЛАТФОРМ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 56

Морозов А. Б., Безгодов А. А. АНАЛИЗ СИСТЕМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТОВАРА НА СКЛАДЕ 59

Мыльников В. А. АНАЛИЗ РИСКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ОТКРЫТОГО ИСХОДНОГО КОДА 63

Мыльников В. А., Елина Т. Н. ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СИСТЕМ 66

Фомичева С. Г. АНАЛИЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ОПЕРАТИВНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ СЛОЖНЫХ ВИЗУАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ 69

Фомичева С. Г. ОТСЛЕЖИВАНИЕ ЦЕЛЕВЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗАДАЧАХ ВИДЕОМОНИТОРИНГА 73

Фомичева С. Г., Карапугина Д. В. АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ ДИСКРЕТНЫХ TPM ЗАРУБЕЖНЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ 78

Хуцаева А. Ф., Ж.-М. Н. Дакуо, Голованов А. А., Давыдов В. В. КРИПТОГРАФИЯ НА ИЗОГЕНИЯХ: АНАЛИЗ ОБЛАСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ 82

Чернышева О. Б., Шевкун О. А. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕДИЦИНСКИХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 88

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА 93

Беззатеев С. В., Елина Т. Н. ОСОБЕННОСТИ ТРАЕКТОРИЙ КАРЬЕРНОГО РОСТА СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ 93

Мельников С. Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ ПО «ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ» 97

Рулёв А. М., Попов А. К., Криволапчук И. Г. МОДЕРНИЗАЦИЯ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТЕНДА «СЛЕДЯЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД АНТЕННЫ РЛС» 102

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ 109

Антонов М. А., Сержантова М. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ФИЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ 109

Бадика Е. М., Солёный С. В., Зырянов Д. А., Бобрышов А. П., Тимощук А. В. СОЗДАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ЯЧЕЙКИ СОРТИРОВКИ МУСОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ КАМЕР И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА 114

Бойков В. И., Быстров С. В. ЭВОЛЮЦИЯ СИЛОВЫХ ПЬЕЗОАКТЮАТОРОВ С ОГРАНИЧЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ 120

Бойков В. И., Быстров С. В., Бушуев А. Б., Литвинов Ю. В., Нуйя О. С., Сержантова М. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ MATLAB/SIMULINK В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С УЧЕБНЫМИ СТЕНДАМИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ 125

Брунов М. С., Гончарова В. И., Ватаева Е. Ю., Шишлаков Д. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ АППРОКСИМАЦИИ НЕЛИНЕЙНОГО ЗВЕНА ИРРАЦИОНАЛЬНОЙ ФУНКЦИЕЙ 139

Бушуев А. Б., Нуйя О. С., Литвинов Ю. В., Бойков В. И., Сержантова М. В. ИНФОРМАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАМКНУТЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ 146

Ватаева Е. Ю., Гречкин Н. Л., Тимофеев С. С., Шишлаков В. Ф. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ MP238 155

Ватаева Е. Ю., Гречкин Н. Л., Шишлаков Д. В. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ИМПУЛЬСНОЙ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ 158

Зырянов Д. А., Солёный С. В., Бадика Е. М., Бобрышов А. П. АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ADRRT-CONNECT И A ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИ ПЕРЕПЛАНИРУЕМЫХ МАРШРУТОВ НА ПРОИЗВОЛЬНОЙ МЕСТНОСТИ 161

Камышева Л. В. ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ 167

Морева С. Л., Ляшенко А. Л. БАРАБАН-СЕПАРАТОР КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ 171

Шишлаков В. Ф., Решетникова Н. В., Панкратов А. Г. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ 174

Якимовский Д. О., Смолянинов Д. Д. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОДВЕСА СИЛОВОГО ГИРОСКОПА 179

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Бобрышов А. П., Кузьменко В. П., Солёный С. В. ПАРАМЕТРЫ ОСВЕЩЕНИЯ ЭКРАНА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕДУРЫ ПОВЕРКИ 182

Голубков В. А., Ватаева Е. Ю., Федоренко А. Г. МОДЕЛЬ ВИБРАЦИИ ОДНОСТУПЕНЧАТОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ 190

Косулин В. Д., Салова И. А. КАЧЕСТВЕННО-ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ ПРИ СБОРКЕ МУФТЫ С РАДИАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ НА ЕЕ ПАРАМЕТРЫ 194

Лач С. Ю., Солёный С. В. ВЫБОР ХОДОВОЙ ЧАСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ 198

Манин М. Я., Солёная О. Я. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИQ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 203

Мартынов А. А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПУСКА СИЛОВОГО СОГЛАСУЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГРЕБНОГО ВИНТА 212

Прокофьева М. К., Булатов В. В. ОБЗОР МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА 218

Романова М. С., Елтышева И. В. РАЗРАБОТКА КОНФИГУРАТОРА ВЫБОРА УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ДЛЯ ШКАФА КОМПЛЕКТНО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА 228

Семенова Н. Г., Дьяконов А. А. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ СТРУКТУРЫ ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПО ЛИКВИДАЦИИ НАРУШЕНИЙ НОРМАЛЬНОГО РЕЖИМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 232

Сергеев П. А., Бобрышов А. П. Солёный С. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ ФАКТОРОВ НА РАЗВИТИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ 236

Солёная О. Я., Мохомет А. Д. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАССЫ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕКОНСТРУКЦИИ 241

Софронов А. А., Геклер Е. А., Мартынов А. А. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С УЧЕТОМ ОСТАТОЧНОГО ПОТОКА НАМАГНИЧИВАНИЯ 249

Тимофеев С. С., Клинов Я. В., Шорохов С. К. ПОСТРОЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОДЧИНЕННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТОПРОВОДА 259

Тимофеев С. С., Швецов Д. С., Шишков И. А., Панкратов А. Г., Монахов М. А., Никитина К. С. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА 263

Тимофеев С. С., Шишков И. А., Швецов Д. С., Панкратов А. Г., Монахов М. А., Никитина К. С. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО СКОРОСТИ 270

Третьяков Н. К., Кузьменко В. П., Солёная О. Я. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ НА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЕ 276

Чернышева О. Б. РОЛЬ АКТИВНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ 280

Чернышева О. Б., Лебедев И. С. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ И СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕЙ ПЛАТФОРМЫ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ 284

Якимовский Д. О., Полякова Т. Г., Криволапчук И. Г. ПРОГРАММНЫЙ ЗАПУСК ГИРОМОТОРА СИЛОВОГО ГИРОСКОПИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА 290

ЭЛЕКТРОПРИВОД, ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ 296

Хазиева Р. Т., Кантюков Н. Р. РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ Т-ОБРАЗНОГО ФИЛЬТРА В MATLAB SIMULINK 296

Хазиева Р. Т., Мухаметшин А. В. ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ: СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ И АНАЛИЗ ТОКОВ 301

ЭЛЕКТРОФИЗИКА

Кузенов В. В., Полянский А. Г. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЫ МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО КОМПРЕССОРА 307

Сафронов А. А., Кузнецов В. Е., Дудник Ю. Д., Ширяев В. Н., Васильева О. Б. ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ 311

Чубраева Л. И. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА 315

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 321

Научное издание

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'24

XIX Международная конференция по электромеханике и робототехнике 16–17 апреля 2024 г.

Сборник докладов

ISBN: 978-5-8088-1916-0

Ответственные за выпуск:
доктор технических наук, профессор *В. Ф. Шишлаков;*
М. С. Романова

Редакторская подготовка *В. А. Черниковой*
Компьютерная верстка *А. Н. Колешко*

Подписано к печати 28.03.2024. Дата выхода в свет: 04.04.2024.
Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 41,7. Уч.-изд. л. 42,5. Тираж 150 экз. Заказ № 69.

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Распространяется бесплатно