



ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2022 Т. 30. № 1

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

**Вестник
Самарского
Государственного
Технического
Университета**

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Издается с августа 1993 г.

Выходит 4 раза в год

Серия

«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2022. Том 30. № 1

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Главный редактор серии Ю.Э. Плешивцева (д.т.н., проф.)

Отв. секретарь серии О.С. Афанасьева (к.т.н.)

Редакционная коллегия:

А.М. Абакумов (д.т.н., проф.)

В.И. Батищев (д.т.н., проф.)

С.Ю. Боровик (д.т.н., проф.)

Ю.В. Зубков (д.т.н., проф.)

Л.С. Казаринов (д.т.н., проф.)

О.С. Колосов (д.т.н., проф.)

П.К. Кузнецов (д.т.н., проф.)

В.И. Лачин (д.т.н., проф.)

М.Ю. Лившиц (д.т.н., проф.)

С.П. Орлов (д.т.н., проф.)

Л.Д. Певзнер (д.т.н., проф.)

Э.Я. Рапопорт (д.т.н., проф.)

А.В. Стариков (д.т.н., проф.)

Е. Вааке (проф., Германия)

S. Luri (проф., Италия)

B. Naske (проф., Германия)

M. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2022. Том 30. № 1)

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус

Редактор Г.В. Загребина
Компьютерная верстка О.С. Афанасьева

Свидетельство о регистрации
ПИ №ФС 77-64449 от 31.12.2015.

Подписано в печать 06.06.22
Выход в свет 16.06.22

Адрес редакции и издателя:
ФГБОУ ВО «Самарский
государственный
технический университет»
443100, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244
Главный корпус

Формат 70 × 108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 24,19 п.л.
Уч.-изд. л. 23,65 п.л.
Тираж 40 экз. Рег. № 71/22
Заказ № 297

Телефон: (846) 337 04 43
E-mail: vest_teh@samgtu.ru
Факс: (846) 278 44 40

Отпечатано в типографии Самарского
государственного технического университета
Адрес типографии:
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.
Корпус 8

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим группам научных специальностей: 05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление; 05.11.00 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; 05.09.00 – Электротехника.

Полнотекстовый доступ к статьям журнала осуществляется на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU (<http://elibrary.ru>)
и на сайте <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» 18106
ISSN 1991-8542

© Авторы, 2022

© Самарский государственный
технический университет, 2022

ФЗ № 436-ФЗ	Издание не подлежит маркировке в соответствии с п. 1 ч. 2 ст. 1
----------------	--

Цена свободная

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Vestnik of
Samara
State
Technical
University

SCIENTIFIC JOURNAL

Published since August 1993

Four Issues a Year

Technical Sciences Series

2022. Vol. 30. Issue 1

Founder – Samara State Technical University

Editor-in-Chief of Series Y.E. Pleshivtseva (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Execute Secretary of Series O.S. Afanaseva (PhD Techn.)

Editorial board

A.M. Abakumov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E. Baake (Prof. Leibniz University of Hannover, Germany)

V.I. Batishchev (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S.Y. Borovik (Dr. Techn. Sci., Prof.)

M. Forzan (Prof., University of Padua, Italy)

L.S. Kazarinov (Dr. Techn. Sci.)

O.S. Kolosov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

P.K. Kuznetsov P. K. (Dr. Techn. Sci., Prof.)

V.I. Lachin (Dr. Techn. Sci., Prof.)

M.Y. Livshits (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S. Lupi (Prof., University of Padua, Italy)

B. Nacke (Prof., Leibniz University of Hannover, Germany)

S.P. Orlov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L.D. Pevzner (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E.Y. Rapoport (Dr. Techn. Sci., Prof.)

A.V. Starikov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Yu.V. Zubkov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Edited by G. V. Zagrebina
Compiled and typeset by O. S. Afanaseva

The Editorial Board Address:

Dept. of Applied Mathematic and Computer Science
Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Phone: +7(846) 337 04 43

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Printed at the Samara State Technical University Press

The journal is included in the Russian Science Citation Index.

The journal is included in VINITI (<http://www.viniti.ru>)_abstracts databases.

The full-text electronic version of journal is hosted by the web-site of scientific electronic library eLIBRARY.RU and by the site SamGTU (<http://vestnik-teh.samgtu.ru>) and by the site <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

The subscription index in Rospechat catalogue 18106

ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

<i>Афанасьева О.С., Афанасьева Е.А., Егорова Г.Ф.</i> Аналитическая аппроксимация и численное моделирование ликвидусов для неравновесных многокомпонентных эвтектических систем	6
<i>Галузин В.А.</i> Разработка моделей, методов и средств создания цифровой платформы согласованного планирования целевого применения гетерогенных группировок малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.....	20
<i>Лысенко Д.С.</i> Интеллектуальная система адаптации типовых законов автоматического регулирования с функцией идентификации структуры и параметров объекта.....	46
<i>Орлов С.П., Ефимушкин Н.А., Ефимушкина Н.В.</i> Глубокая нейронная сеть для диагностики элементов железнодорожного рельсового пути ...	63

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

<i>Бочкарев А.В., Сайфуллин Р.Т.</i> Сглаживание хроматографических сигналов путем их аппроксимации в базисе функций Чебышева – Эрмита.....	75
---	----

Электротехника

<i>Данилушкин А.И., Данилушкин В.А.</i> Разработка и исследование системы индукционного нагрева в технологических комплексах транспортировки нефти.....	90
<i>Кротков Е.А., Безменова Н.В., Щобак А.А.</i> Учет провисания проводов в пролете ВЛ 220 кВ при определении тока, наведенного в грозозащитном тросе магнитными полями токов фаз.....	106
<i>Москалев Ю.В.</i> Определение количества витков и схемы соединения катушек вторичной обмотки трехфазно-многофазного трансформаторного преобразователя числа фаз.....	118
<i>Скрипачев М.О., Ведерников А.С.</i> Влияние параметров сети оперативного постоянного тока на работу системы контроля изоляции на землю.....	130

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 541.123/.123.8/9

АНАЛИТИЧЕСКАЯ АППРОКСИМАЦИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИКВИДУСОВ ДЛЯ НЕРАВНОВЕСНЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

О.С. Афанасьева, Е.А. Афанасьева, Г.Ф. Егорова *

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: afa_samara@inbox.ru

Аннотация. В первой части статьи рассматриваются способы аналитической аппроксимации кривых ликвидуса для двухкомпонентных и трехкомпонентных систем и их визуализации средствами компьютерной графики. Для двухкомпонентных систем предлагается методика приближенного построения кривых ликвидуса, основанная на аппроксимации их полиномами первой и второй степени. Сравниваются диаграммы плавкости, полученные с помощью решения системы Шредера Ле Шателье и кривых ликвидуса, построенных на основе их приближения полиномами. Приводится значение максимального отклонения этих аппроксимаций друг от друга. Отдельно рассматриваются погрешности диаграмм плавкости двух систем: $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2\text{-KClO}_4$ и $\text{BaF}_2\text{-BaSO}_4$, полученных экспериментальным путем и построенных с помощью системы уравнений Шредера Ле Шателье и аппроксимации их полиномами первой и второй степени. Во второй части статьи предлагается методика построения поверхностей ликвидусов для трехкомпонентных систем, основанная на предложенных авторами приближенных формулах вычисления характеристик эвтектик двухкомпонентных и трехкомпонентных систем и линейной аппроксимации изотерм трехкомпонентных систем. На основе предложенной процедуры аппроксимации созданы программы расчета состава и температуры эвтектики для двухкомпонентных систем и построения изотерм трехкомпонентных систем в визуальной среде программирования Delphi с пользовательским интерфейсом. Приводится таблица погрешностей расчетов характеристик эвтектик для трехкомпонентных систем. Представлены результаты визуализации численного моделирования поверхностей ликвидуса для трехкомпонентных эвтектических систем и сравнения их с экспериментально полученными образцами поверхностей кристаллизации для двух систем: $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2\text{-KClO}_4$ и $\text{BaF}_2\text{-BaSO}_4$.

* Афанасьева Ольга Сергеевна, доцент кафедры «Прикладная математика и информатика», кандидат технических наук.

Афанасьева Елена Андреевна, аспирант кафедры «Прикладная математика и информатика».

Егорова Галина Федоровна, доцент, кандидат технических наук.

Ключевые слова: *эвтектика, изотермы, концентрация, температура плавления, аппроксимация, трехкомпонентные системы, двухкомпонентные системы, ликвидус, энтальпия.*

Введение

Целью исследования фазовых состояний химических многокомпонентных систем является не только определение их количественных характеристик, но и в идеале прогнозирование и создание новых композиций с заданными свойствами. Экспериментальное получение диаграмм плавкости двухкомпонентных и поверхностей ликвидусов трехкомпонентных систем представляет собой затратный по времени и трудовым ресурсам процесс. Результаты исследовательской работы химиков-экспериментаторов демонстрируют, что для большинства реальных систем прогнозирование диаграмм плавкости оказывается принципиально невозможным в виду бесконечного разнообразия свойств химических соединений. Тем не менее, как показывают исследования [1–9], существует целый класс химических соединений, для которых расчет, основанный на выявлении аналитических зависимостей между термическими характеристиками, позволяет вычислять характеристики эвтектик и поверхностей ликвидусов как для двухкомпонентных, так и для трехкомпонентных систем. Главным требованием к таким системам является наличие у них единственной точки эвтектики. Это требование, в частности, выполняется для трехкомпонентных систем при том условии, что входящие в их состав бинарные системы являются эвтектическими (с наличием единственной точки эвтектики). Поскольку двухкомпонентных систем, удовлетворяющих этому требованию, огромное количество, то проблема аналитического оценивания и компьютерного моделирования фазовых портретов трехкомпонентных систем остается актуальной.

Построение ликвидусов для двухкомпонентных систем с помощью численной аппроксимации

Рассмотрим вопросы построения графиков кривых ликвидуса для двухкомпонентных систем аналитическими методами. Хорошо известна система уравнений Шредера Ле Шателье:

$$\begin{cases} \ln x = -\frac{\Delta H_1}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T} \right), \\ \ln(1-x) = -\frac{\Delta H_2}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T} \right), \end{cases} \quad (1)$$

здесь ΔH_1 , ΔH_2 , R – энтальпии плавления первого и второго компонентов и универсальная газовая постоянная соответственно; x_1 , x_2 – мольные доли первого и второго компонентов; T_1 , T_2 , T – температуры плавления компонентов и искомая температура термодинамического равновесия соответственно.

Система (1) позволяет определять не только мольные доли компонентов и температуру эвтектики, но и строить ветви ликвидуса для двухкомпонентных систем [1–3]:

$$T = \frac{\Delta H_1 T_1}{\Delta H_1 - \ln(1-x)RT_1};$$

$$T = \frac{\Delta H_2 T_2}{\Delta H_2 - \ln(x)RT_2}.$$
(2)

Погрешность результатов его применения, как и любого численного метода, существенным образом зависит от точности значений коэффициентов, входящих в уравнения системы. Поскольку в эту систему уравнений в качестве параметров входят кроме температур плавления также и значения энтальпии (теплоты) плавления компонентов, которые имеются не во всей справочной литературе, то это обстоятельство препятствует широкому использованию метода в практике предварительного исследования систем. В работе [10] предлагался метод прогнозирования значений температуры и состава эвтектик для бинарных систем на основе известных температур плавления компонентов систем:

$$T_3 \approx T_1 \left(1 - \frac{T_1^2}{(T_1 + T_2)^2} \right), \quad x_1 = \frac{T_2 - T_3}{T_1 + T_2 - 2T_3}, \quad x_2 = 1 - x_1.$$
(3)

Здесь x_1 , x_2 – мольные доли первого и второго компонентов; T_1 , T_2 , T_3 – температуры плавления компонентов и искомая температура термодинамического равновесия соответственно. Были произведены расчеты для 25 систем с вычислением соответствующих погрешностей. Для температуры использовалась оценка точности с помощью относительной погрешности

$$\delta T = \frac{|T_3 - T|}{T},$$

для концентраций использовалась среднеквадратическая, несмещенная оценка погрешности

$$\Delta x = \frac{1}{2} \sqrt{(x_1 - \tilde{x}_1)^2 + (x_2 - \tilde{x}_2)^2 + (x_3 - \tilde{x}_3)^2}.$$

Здесь T – вычисленные значения температуры эвтектики; T_3 – экспериментально полученное значение температуры эвтектики; x_i , \tilde{x}_i – экспериментальные и вычисленные значения концентраций компонентов системы. Сравнение результатов расчетов с помощью системы (1) и по формулам (3) для 25 систем показали, что среднее арифметическое погрешностей решений для системы Шредера Ле Шателье составляют 5 % по температуре и 6 % по составу, а по формулам (3) – 6 и 7 % соответственно. В связи с тем, что погрешности численной процедуры, предложенной в работе [10], и результатов расчетов с использованием системы (1) оказались сопоставимыми, поскольку их средние значения разнятся на 1 %, была продолжена работа по исследованию зависимости температуры систем от соотношения концентраций ее компонентов.

На рис. 1 видно, что если отразить симметрично относительно ветвей ликвидуса, аппроксимированных отрезками прямых, параболу, проходящую через три точки $(0, T_1)$, (x_2, T_3) , $(1, T_2)$, известные из расчетов по формулам (3), то верхние ветви этих кривых будут качественно совпадать по поведению с экспериментальными линиями ликвидуса. Понятно, что погрешность такого приближения велика и необходим весовой коэффициент, который позволит приблизить значения этих ветвей к значениям ликвидуса с допустимой погрешностью, не превы-

шающей 10–15 %. Для определения величины или порядка этого коэффициента можно использовать выражения для ветвей ликвидуса (2). Рассмотрим первое из них, считая, что T_1 – вещество с меньшей температурой плавления:

$$T = \frac{\Delta H_1 T_1}{\Delta H_1 - \ln(1-x)RT_1}.$$

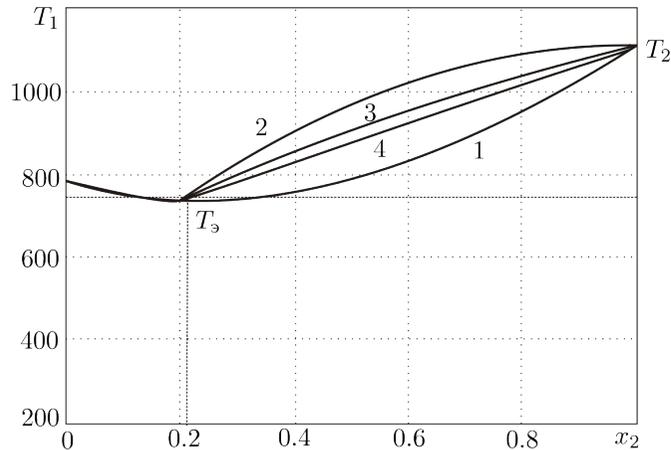


Рис. 1. Диаграмма плавкости двухкомпонентной системы: 1 – исходная парабола; 2 – симметричная парабола; 3 – парабола с весовым коэффициентом; 4 – отрезок прямой T_3T_2

Воспользуемся тем, что для более тугоплавкого компонента $x < 0.5$ и $\ln(1-x) \approx -x$, его можно преобразовать к следующему виду:

$$T = \frac{T_1}{1 - \ln(1-x)RT_1 / \Delta H_1} \approx \frac{T_1}{1 - xRT_1 / \Delta H_1}.$$

Учитывая также, что для большинства химических соединений $\frac{RT_1}{\Delta H_1} \leq 1$, можно записать дробь в правой части в виде ряда

$$T \approx T_1 \left[1 + x \frac{RT_1}{\Delta H_1} + x^2 \left(\frac{RT_1}{\Delta H_1} \right)^2 \left[1 + x \frac{RT_1}{\Delta H_1} + x^2 \left(\frac{RT_1}{\Delta H_1} \right)^2 \right] + o \left(x^5 \left(\frac{RT_1}{\Delta H_1} \right)^5 \right) \right]. \quad (4)$$

Аналогичную процедуру можно произвести с другой ветвью. В результате вычитания из (4) его линейной части $\tilde{T} \approx T_1 \left(1 + x \frac{RT_1}{\Delta H_1} \right)$ получаем оценку разности между линейной и квадратичной аппроксимациями этой ветви ликвидуса:

$$T - \tilde{T} \approx T_1 \left[x^2 \left(\frac{RT_1}{\Delta H_1} \right)^2 \left(1 + x \frac{RT_1}{\Delta H_1} + x^2 \left(\frac{RT_1}{\Delta H_1} \right)^2 \right) \right].$$

Таким образом, значения линии параболы, соединяющей две известные точки, отличаются от отрезка прямой линии, проведенной через те же точки, на величину

$$x^2 T_1 \left(\frac{RT_1}{\Delta H_1} \right)^2 \leq 0,25 \left(\frac{RT_1}{\Delta H_1} \right)^2 T_1 \leq 0,25 T_1.$$

Исходя из предположения, что $\max T_1 < 3500 \text{ }^\circ\text{C}$ и $(T - \tilde{T}) \leq (T_1 - T_3) < 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, коэффициент, на который следует умножить эту разность и который обеспечит достижение максимальной относительной погрешности значений разности

$$\frac{T - \tilde{T}}{T_1 - T_3} \leq 0,06,$$

должен иметь порядок величины x_2^2 – квадрата мольной доли тугоплавкого компонента в системе. Запишем формулы, соответствующие параметрам полиномов первой и второй степени, проходящих через три известные точки $(0, T_1)$, (x_2, T_3) , $(1, T_2)$:

$$k_1 = \frac{T_1 - T_3}{x_2}; \quad b_1 = T_1; \quad T_1 = b_1 - k_1 x; \quad a = -\frac{T_3 - (T_2 - T_1)x_2 - T_1}{x_1 x_2};$$

$$\tilde{T} = ax^2 + bx + c; \quad b = T_2 - T_1 - a; \quad c = T_1; \quad k_2 = \frac{T_2 - T_3}{x_1};$$

$$b_2 = T_3; \quad T_2 = b_2 + k_2(x - x_2).$$

Тогда ветви ликвидуса будут выражаться следующими формулами зависимости температуры от концентрации веществ:

$$T = T_1 + (T_1 - \tilde{T})(x_2)^2, \quad 0 \leq x \leq x_2;$$

$$T = T_2 + (T_2 - \tilde{T})(x_2)^2, \quad x_2 < x \leq 1. \quad (5)$$

Для 8 систем проводилось сравнение полученных с помощью данной процедуры аппроксимаций ликвидусов с кривыми ликвидусов, построенными с помощью системы уравнений Шредера Ле Шателье. Результаты расчетов систем показали довольно существенные расхождения в значениях температур и соответствующих концентраций. Максимальное расхождение в значениях графиков кривых было выявлено для системы CsCl – CsF и составило $157 \text{ }^\circ\text{C}$ по температуре и 0,11 по мольным долям компонентов эвтектики.

Для систем $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2\text{--KClO}_4$ и $\text{BaF}_2\text{--BaSO}_4$ представлены диаграммы плавкости, полученные экспериментально [11, 12] и с помощью аналитических расчетов по формулам (5) и уравнений Шредера Ле Шателье (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Расчет систем $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2\text{--KClO}_4$ по формулам (5) и уравнениям Шредера Ле Шателье

	ΔH (КДж/моль)	$\Delta H / R$	T плавления
$\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$	9,87	1187,00	473
KClO_4	10,77	1295,49	570
T_3 – уравнение Шредера	x_1 – уравнение Шредера	T_3 – формулы (5)	x_1 – формулы (5)
393	0,71	375	0,67

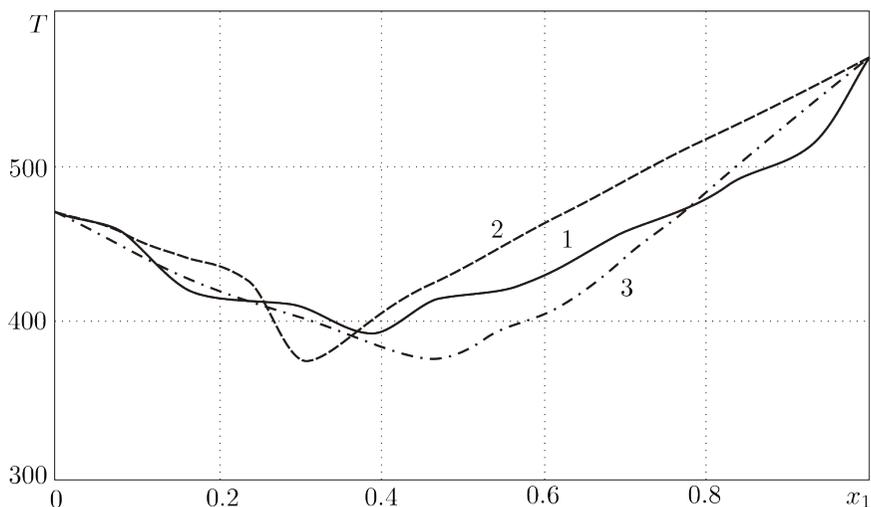


Рис. 2. Максимальные отклонения от экспериментальных данных (кривая 1) системы $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2\text{-KClO}_4$ расчетных кривых по уравнению Шредера (кривая 2) – 28,8 °С и формулам (5) (кривая 3) – 37,5 °С

Таблица 2

Расчет систем $\text{BaF}_2\text{-BaSO}_4$ по формулам (5) и уравнениям Шредера Ле Шателье

	ΔH (КДж/моль)	$\Delta H / R$	T плавления
BaF_2	17,50	2149,88	1332
BaSO_4	41,00	5036,86	1580
T_s – уравнение Шредера	x_1 – уравнение Шредера	T_s – формулы (5)	x_1 – формулы (5)
1117	0,73	1053	0,65

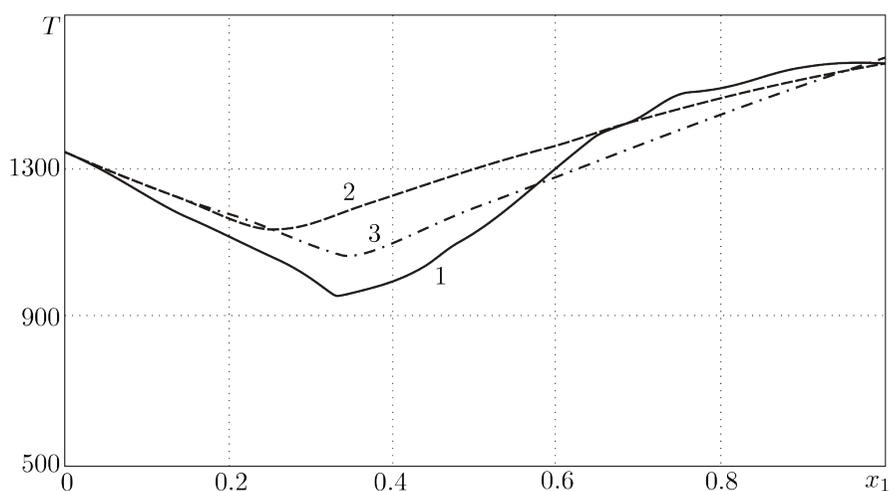


Рис. 3. Максимальные отклонения от экспериментальных данных (кривая 1) системы $\text{BaF}_2\text{-BaSO}_4$ расчетных кривых по уравнению Шредера (кривая 2) – 229 °С и формулам (5) (кривая 3) – 107 °С

Как видно из рис. 2 и 3, отклонения кривых ликвидуса, вычисленных с помощью уравнений Шредера Ле Шателье и формул (5), имеют один порядок, но графики, визуализирующие квадратичные аппроксимации (5), имеют большее число точек пересечения с обеими ветвями экспериментальных кривых. Основным выводом из проведенной работы можно считать, что несмотря на погрешности численного моделирования предварительное теоретическое исследование позволяет значительно уменьшить интервалы значений концентраций и температур, для которых имеет смысл проведение экспериментов, что может позволить значительно сократить время и энергетические затраты на исследование систем опытным путем.

Построение изотерм для трехкомпонентных систем с помощью линейной аппроксимации

Разработанная процедура априорной визуализации кривых ликвидуса для двухкомпонентных систем привела к созданию простого способа предварительного прогнозирования поведения изотерм для трехкомпонентных систем. В основу разработки метода была положена гипотеза о том, что в эвтектической системе содержание легкоплавкого и тугоплавкого компонентов должно зависеть от соотношения их температур плавления, причем линейно. Линейная аппроксимация термодинамических зависимостей является распространенной практикой исследования различных физико-химических процессов [13–17]. В данном случае это позволило бы облегчить построение изотерм в трехкомпонентной системе и отобразить качественную картину их расположения в целом.

Предлагаемый алгоритм линейной аппроксимации изотерм двухкомпонентных эвтектических систем иллюстрируется примером, представленным на рис. 4.

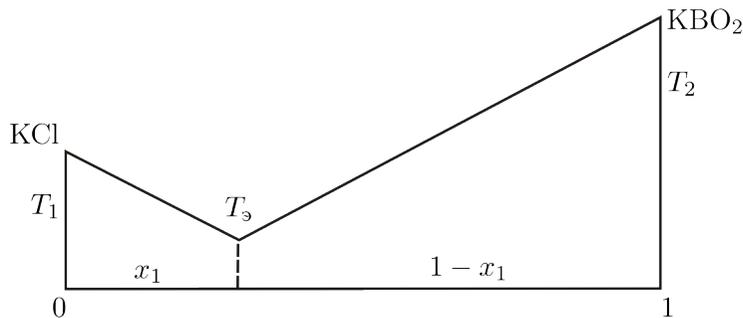


Рис. 4. Линейная аппроксимация эвтектики двухкомпонентной системы KCl–KBO₂

Введем обозначение для концентрации эвтектики данной двухкомпонентной системы: KBO₂– x_1 и для KCl– $(1-x_1)$ соответственно. Температура состава KBO₂–KCl в зависимости от изменения концентрации KBO₂– x будет вычисляться по формулам

$$T = T_3 + \frac{(T_1 - T_3)x}{x_1} \quad (6)$$

или

$$T = T_1 - \frac{(T_1 - T_3)x}{x_1}.$$

На участке, расположенном правее точки эвтектики, концентрация компонента KVO_2 будет равна $(x_1 + x)$, KCl соответственно $(1 - x_1 - x)$, поэтому температура состава будет вычисляться по формулам

$$T = T_3 + \frac{(T_2 - T_3)x}{1 - x_1} \quad (7)$$

или

$$T = T_2 - \frac{(T_2 - T_3)(1 - x_1 - x)}{1 - x_1}.$$

Таким же образом с использованием зависимостей (6) и (7) между температурами эвтектик и концентрациями можно приближенно вычислять значения промежуточных температур на сторонах треугольника Гиббса и вдоль прямых, соединяющих вершины треугольника с точками (в том числе и эвтектическими) на противоположных сторонах. В результате оказывается возможным программно рассчитывать значения температур в любых точках внутри треугольника и строить на их основе изотермы в качестве отрезков прямых, соединяющих точки на сторонах треугольника и проходящих через секущие, связывающие вершины с точками эвтектик на противоположных сторонах. На основе предложенной методики линейной аппроксимации была разработана программа в визуальной среде программирования Delphi, позволяющая строить приближенную поверхность кристаллизации в треугольнике Гиббса.

В данной программе для расчетов используются только значения температур плавления, входящих в систему веществ. Промежуточные вычисления, однако, требуют знания значений составов концентраций и температур эвтектик бинарных систем, входящих в качестве компонентов низшей размерности в исследуемую трехкомпонентную систему, а также состава и температуры ее эвтектики. Процедура вычисления вспомогательных значений составов и температур эвтектик бинарных систем в предлагаемой программе производится по формулам из статьи авторов [10]. Так, вычисление температуры эвтектики и концентрации тугоплавкого компонента для двухкомпонентной системы (KVO_2 на рис. 4) осуществляется по формулам

$$x_1 = \frac{T_2}{T_1 + T_2}, \quad x_2 = 1 - x_1;$$

$$T_3 \approx T_1 x_1 + T_2 x_1 (1 - x_1) = T_1 x_1 (1 + x_2) = T_1 (1 - x_2^2),$$

уточненное значение концентрации легкоплавкого компонента

$$x_1 = \frac{T_2 - T_3}{T_1 + T_2 - 2T_3}.$$

Здесь T_1 , T_2 , T_3 – соответственно температуры плавления 1-го и 2-го компонентов и температура эвтектики; x_1 , x_2 – содержание 1-го и 2-го компонентов в мольных долях.

Для вычисления температур эвтектики и ее состава для трехкомпонентных систем использовались формулы из [18]:

$$T_3^{1-2-3} = \frac{T_3^{1-2} (T_3^{1-3} + T_3^{2-3} + T_3)}{T_1 + T_2 + T_3};$$

$$c_3 = \frac{T_9^{1-2} - T_9^{1-2-3}}{T_9^{1-2} + T_3 - 2T_9^{1-2-3}}.$$

Концентрации двух других веществ определяются по формулам

$$c_2 = x_2^{1-2} - x_2^{1-2} c_3, \quad c_1 = x_1^{1-2} - x_1^{1-2} c_3,$$

где T_i , T_9^{i-k} , ($i, k = 1, 2, 3$) – температуры плавления компонентов и температуры эвтектик в двухкомпонентных системах соответственно; T_9^{1-2-3} – температура эвтектики в трехкомпонентной системе; x_i^{i-k} , c_i , $i, k = 1, 2, 3$ – содержание i -го компонента в мольных долях в двухкомпонентных и трехкомпонентной системах.

На рис. 5 представлены поверхности ликвидуса из справочника [19], построенные с помощью вычисленных программой значений. Экспериментально полученные значения температуры эвтектики трехкомпонентной системы и концентрации входящих в нее веществ равны соответственно: 640 °С, KCl – 56 %, KVO₂ – 30 %, K₂SO₄ – 14 %. На рис. 5, б представлены вычисленные значения мольных долей компонентов, нижняя, верхняя и усредненная оценка температуры эвтектики и изотермы, построенные с помощью разработанной программы.

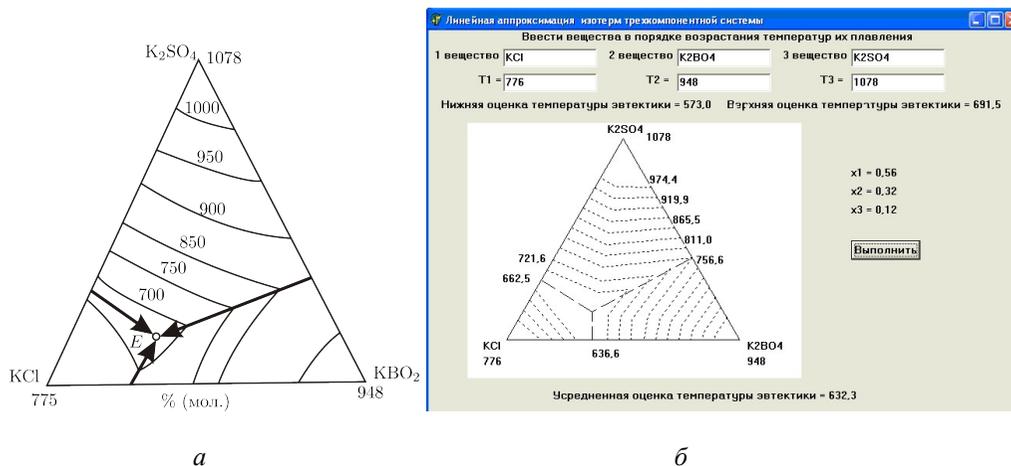


Рис. 5. Изотермы: а – из справочника [14]; б – построенные с помощью линейной аппроксимации (погрешность составляет по температуре 1 % и по составу 1 %)

Для температуры использовалась оценка точности с помощью относительной погрешности

$$\delta T = \frac{\left| \frac{1}{2}(\tilde{T}_d + \tilde{T}_u) - T \right|}{T}, \quad (8)$$

для концентраций использовалась среднеквадратическая, несмещенная оценка погрешности

$$\Delta x = \frac{1}{2} \sqrt{(x_1 - \tilde{x}_1)^2 + (x_2 - \tilde{x}_2)^2 + (x_3 - \tilde{x}_3)^2}. \quad (9)$$

Здесь \tilde{T}_d – нижняя и \tilde{T}_u – верхняя оценки, вычисленные по программе значения температуры эвтектики; T – экспериментально полученное значение температу-

ры эвтектики; x_i , \tilde{x}_i – экспериментальные и вычисленные по программе значения концентраций компонентов системы.

В качестве характерного примера на рис. 6 представлены экспериментально построенные изотермы и поверхность кристаллизации, рассчитанная с помощью программы для системы $\text{LiBO}_2/\text{NaBO}_2/\text{Mg}(\text{BO}_2)_2$.

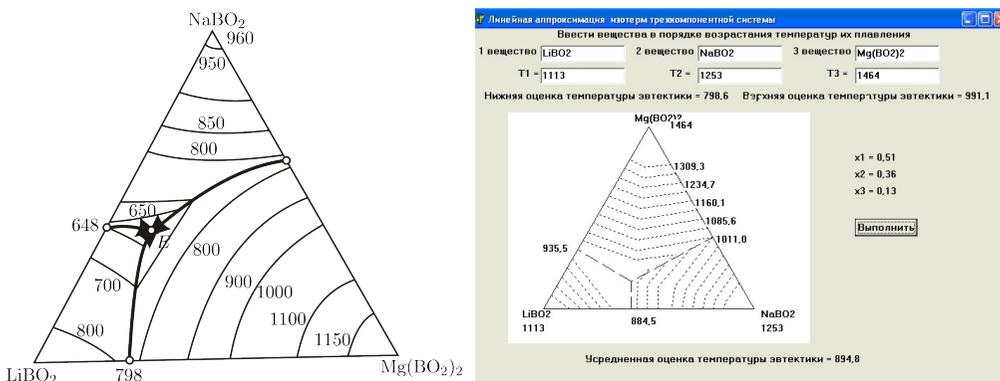


Рис. 6. Изотермы: *a* – из справочника [14]; *б* – построенные с помощью линейной аппроксимации (погрешность по температуре 3 %, по составу 3 %)

Особенностью программы является предпочтительное использование шкалы Кельвина при значительной разнице в значениях температур плавления, входящих в состав системы веществ.

В таблице 3 представлены погрешности результатов расчетов изотерм для 30 трехкомпонентных систем в сравнении с данными из [19, 20].

Таблица 3

Погрешности результатов расчет трехкомпонентных систем

Название веществ системы	Погрешность		Название веществ системы	Погрешность	
	по температуре, %	по составу, %		по температуре, %	по составу, %
K//SO ₄ /Cl/BO ₂	1	1	Ce/Na/Sn//Cl	1,2	5
Li//F/Cl/CO ₃	2	9	Ce/Fe/Sn//Cl	0,1	4
Na/K/Li//F	8	4	Ca/La/Na//Cl	8	7
Ba/Na/Cs//F	0,1	6	Li/Mg/Sr//F	6	14
Ca/K/Na//NO ₃	0,1	7	Na//CNS/SO ₄ /Cl	5	7
Ba/Na/Ca//F	4	5	Na//CO ₃ /C/F	1	4
Li/Na/Sr//F	3	5	Na/Cl/P ₂ O ₇ /SO ₄	4	4
Li/Mg/Na//BO ₂	3	3	Na//Cl/F/P ₂ O ₇	5	7
K/Na/Sr//F	1	12	K//PO ₄ /P ₂ O ₇ /SO ₄	1	9
Cs/K/Na//NO ₃	1	7	Ba/Ca/Na//F	7	6
Cs/K/Na//Br	4	1	H ₂ O-NH ₄ NO ₃ -KNO ₃	5	6
Ca/Li/Na//F	5	7	H ₂ O-NH ₄ NO ₃ -NaNO ₃	5	7
Ca/Li/Mg//F	2	2	H ₂ O-NaNO ₃ -KNO ₃	7	3
K/Li/Sr//F	7	2	CO(NH ₂) ₂ -NaNO ₃ -KNO ₃	4	6
Li ₄ /K ₄ /Na ₄ //P ₂ O ₇	8	8	Na//Cl/SO ₄ /BO ₂	11	2
Средние погрешности				5	6

Результаты сравнения поверхностей ликвидусов для 30 эвтектических систем из справочника [19] и монографии [20] показали, что принципиального, качественного расхождения в картинах расположения изотерм не наблюдается. Средняя погрешность по концентрациям составила 6 %, по температуре 5 %. Для 30 исследованных авторами поверхностей ликвидусов погрешности по температуре не превысили 11 %, среди погрешностей по концентрациям для одной из систем она составила 14 %.

Представленные результаты позволяют говорить о несомненной эффективности использования численного моделирования изотерм и их линейной аппроксимации с точки зрения минимизации подтверждающих экспериментов и визуализации поверхностей ликвидусов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аленова С.М., Колядо А.В., Гаркушин И.К.* Исследование фазовых равновесий в двухкомпонентных системах, содержащих адипиновую, глутаровую, азелаиновую, себациновую кислоты // *Proceedings: International Conference on thermal analysis and Calorimetry in Russia (RTAC – 2016). Vol. I. St. Petersburg: SPbPU Publisher, 2016. С. 536–539.*
2. *Аленова С.М., Колядо А.В., Гаркушин И.К.* Диаграммы системы из двухосновных органических кислот: адипиновой, глутаровой, себациновой // *Журн. физ. химии. 2016. Т. 90. № 6. С. 964–968.*
3. *Аленова С.М., Колядо А.В., Гаркушин И.К.* Исследование фазовых равновесий в системе из двухосновных органических кислот: адипиновой, глутаровой, себациновой // *Изв. Саратовского университета. Новая серия. Сер. Химия, Биология, Экология. 2016. Т. 16. № 3. С. 270–273.*
4. *Brunet Luc E., Caillard Jean, Andre Pascal.* Thermodynamic Calculation of n-component Eutectic Mixtures // *International Journal of Modern Physics World Scientific. 2004. Vol. 15(5). P. 675–687.*
5. *Hakeem Muhammed, Olawale Amuda, Akabekwa Raymond Otiito.* Estimating the Eutectic Composition of Simple Binary Alloy System Using Linear Geometry // *Leonardo Journal of Sciences. 2008. Issue 12. P. 232–242.*
6. *Rahman I., Das A.Kr., Mankar R.B., Kulkarni B.D.* Evaluation of repulsive particle swarm method for phase equilibrium and phase stability problems // *Fluid Phase Equilibria. 2009. Vol. 282. No. 2. P. 65–67.*
7. *Shcherban A.P., Datsenko O.A., Kovtun G.P.* Construction of Solidus Lines of Binary Metal Systems Having a Low Solubility of Components in the Solid Phase // *Open Journal of Metal. 2014. Vol. 4. P. 65–71.*
8. *Davies R.H., Dinsdale A.T., Gisby J.A.* MTDATA / Thermodynamic and Phase Equilibrium Software from the National Physical Laboratory // *CALPHAD. 2002. Vol. 26, № 2. P. 229–271.*
9. *Verdieva Z.N., Alkhasov A.B., Verdiev N.N., Rabadanov G.A., Arbukhanova P.A., Iskenderov E.G.* Фазовые равновесия в системе $(\text{LiF})_2 - \text{Li}_2\text{CO}_3 - \text{Li}_2\text{SO}_4$ // *Изв. высших учебных заведений. Сер.: Химия и химическая технология. 2018. № 62(1). С. 20–25. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196201.5727>*
10. *Афанасьева О.С., Егорова Г.Ф., Моргунова О.Е.* Расчет состава и температур эвтектик двухкомпонентных систем по известным температурам плавления исходных веществ // *Вестн. Самар. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-матем. науки. 2009. № 1(18). С. 228–238.*
11. *Диаграммы плавкости солевых систем: Справочник. Ч. II. Двойные системы с общим анионом. Под ред. В.И. Посыпайко. М.: Металлургия, 1977. 303 с.*
12. *Диаграммы плавкости солевых систем: Справочник. Ч. III. Двойные системы с общим катионом. Под ред. В.И. Посыпайко, Е.А. Алексеевой, Н.А. Васина. М.: Металлургия, 1979. 208 с.*
13. *Борщевский А. Я.* Физическая химия. Т. 1. М.: Инфра, 2017. 868 с.
14. *Базаров И. П.* Термодинамика. СПб.–М.–Краснодар: Лань, 2010. 384 с.
15. *Стромберг А.Г., Семченко Д.П.* Физическая химия: Учеб. для хим. спец. вузов. М.: Высш. шк., 2006. 527 с.
16. *Atkins P., Jones L.* Chemical Principles: The Quest for Insight (4th ed.). W. H. Freeman and Company, 2008. 236 pp.

17. *Белов Г.В.* Термодинамика. Ч. 2. М.: Юрайт, 2016. 384 с.
18. *Афанасьева О.С., Егорова Г.Ф.* Расчет состава и температур эвтектик трех- четырехкомпонентных систем по известным характеристикам двухкомпонентных систем // Вестн. Самар. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-матем. науки. 2011. № 1(25). С. 134–145.
19. Диаграммы плавкости солевых систем: Справочник. Ч. IV. Тройные системы. Под ред. В.И. Посыпайко, Е.А. Алексеевой, Н.А. Васина. М.: Химия, 1977. 392 с.
20. *Моргунова О.Е., Трунин А.С.* Электронный генератор фазовых диаграмм физико-химических систем. Самара: СамГТУ, 2006. 136 с.

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2021 г.

ANALYTICAL APPROXIMATION AND NUMERICAL SIMULATION OF LIQUIDUS FOR NON-EQUILIBRIUM MULTI-COMPONENT EUTECTIC SYSTEMS

*O.S. Afanaseva, E.A. Afanaseva, G.F. Egorova**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: afa_samara@inbox.ru

Abstract. *In the first part of the article, the methods of analytic approximation of melting curves for two-component systems and their visualization by means of computer graphics are considered. For two-component systems, a method is proposed for the approximate construction of a melting curve, based on their by approximation of polynomials of the first and second degree. The diagrams obtained by solving the Schroeder Le Chatelier system and the liquidus curves constructed on the basis of their approximation by polynomials are compared. The value of the maximum deviation of these approximations from each other is given. The errors of the diagrams of two systems are considered separately: $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2 - \text{KClO}_4$ and $\text{BaF}_2 - \text{BaSO}_4$, obtained experimentally and constructed using a system of Schroeder Le Chatelier equations and their approximation by polynomials of the first and second degree. In the second part of the article, a method is proposed to construct crystallization surfaces for three-component systems based on the approximate formulas for calculation eutectic characteristics of the two-component and three-component systems, and the linear approximations of the three-component systems isotherms. Based on the proposed approximation procedure, a method for calculating the composition and temperature of eutectic for two-component systems, and the construction of three-component system isotherms in the Delphi visual programming environment with the user interface is created. The table of errors of the eutectic characteristics calculations for three-component systems is given. The results of visualization of numerical simulation of liquidus surfaces for three-component eutectic systems and their comparison with experimentally obtained samples of crystallization surfaces for two systems: $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2 - \text{KClO}_4$ and $\text{BaF}_2 - \text{BaSO}_2$ are presented.*

Keywords: *eutectics, isotherms, concentration, melting point, approximation, three-component, two-component systems, liquidus, enthalpy.*

REFERENCES

1. *Alenova S.M., Kolyado A.V., Garkushin I.K.* Issledovanie fazovyh ravnovesij v dvuh-komponentnyh sistemah, soderzhashchih adipinovuyu, glutarovuyu, azelainovuyu, sebacinovuyu kisloty // Proceedings: International Conference on thermal analysis and Calorimetry in Russia (RTAC – 2016). Vol. I. St. Petersburg.: SPbPU Publisher. 2016. P. 536–539.
2. *Alenova S.M., Kolyado A.V., Garkushin I.K.* Diagrammy sistemy iz dvuhosnovnyh organicheskikh kislot: adipinovej, glutarovej, sebacinovej // Zhurn. fiz. himii. 2016. V. 90. № 6. P. 964–968.
3. *Alenova S.M., Kolyado A.V., Garkushin I.K.* Issledovanie fazovyh ravnovesij v sisteme, iz dvuhosnovnyh organicheskikh kislot: adipinovej, glutarovej, sebacinovej // Izv. Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Ser. Himiya, Biologiya, Ekologiya. 2016. V. 16. № 3. P. 270–273.

* *Olga S. Afanaseva, (PhD. Sci. (Techn.)), Associate Professor.
Elena A. Afanaseva, Postgraduate Student.
Galina F. Egorova, (PhD. Sci. (Techn.)), Associate Professor.*

4. Brunet Luc E., Caillard Jean, Andre Pascal. Thermodynamic Calculation of n-component Eutectic Mixtures // International Journal of Modern Physics World Scientific. 2004, 15(5). P. 675–687.
5. Hakeem Muhammed, Olawale Amuda, Akabekwa Raymond Otito. Estimating the Eutectic Composition of Simple Binary Alloy System Using Linear Geometry // Leonardo Journal of Sciences. 2008. Issue 12. P. 232–242.
6. Rahman I., Das A.Kr., Mankar R.B., Kulkarni B.D. Evaluation of repulsive particle swarm method for phase equilibrium and phase stability problems // Fluid Phase Equilibria. 2009. Vol. 282. No. 2. P. 65–67.
7. Shcherban A.P., Datsenko O.A., Kovtun G.P. Construction of Solidus Lines of Binary Metal Systems Having a Low Solubility of Components in the Solid Phase // Open Journal of Metal. 2014. Vol. 4. P. 65–71.
8. Davies R.H., Dinsdale A.T., Gisby J.A. MTDATA / Thermodynamic and Phase Equilibrium Software from the National Physical Laboratory // CALPHAD. 2002. Vol. 26, № 2. P. 229–271.
9. Verdieva Z.N., Alkhasov A.B., Verdiev N.N., Rabadanov G.A., Arbukhanova P.A., Iskenderov E.G. Fazovye ravnovesiya v sisteme $(\text{LiF})_2 - \text{Li}_2\text{CO}_3 - \text{Li}_2\text{SO}_4$ // Izv. vysshih uchebnykh zavedenij. Ser. Himiya i himicheskaya tekhnologiya. 2018. Vol. 62(1). P. 20–25. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196201.5727>
10. Afanaseva O.S., Egorova G.F., Morgunova O.E. Raschet sostava i temperatur evtektik dvuhkomponentnykh sistem po izvestnym temperaturam plavlenniya iskhodnykh veshchestv // Vestn. Samar. gosud. tekhn. un-ta. Ser.: Fiz.-matem. nauki, 2009, № 1(18). P. 228–238.
11. Diagrammy plavkosti solevykh sistem: Spravochnik. Part II. Dvojnye sistemy s obshchim anionom. Pod red. V.I. Posypajko. M.: Metallurgiya, 1977. 303 pp.
12. Diagrammy plavkosti solevykh sistem: Spravochnik. Part III. Dvojnye sistemy s obshchim kationom. Pod red. V.I. Posypajko, E.A. Alekseevoj, N.A. Vasina. M.: Metallurgiya, 1979. 208 pp.
13. Borshchevskij A.Ya. Fizicheskaya himiya. Vol. 1. M.: Infra, 2017. 868 pp.
14. Bazarov I.P. Termodinamika. SPb.–M. –Krasnodar: Lan', 2010. 384 pp.
15. Stromberg A.G., Semchenko D.P. Fizicheskaya himiya: Ucheb. dlya him. spec. vuzov. M.: Vyssh. shk., 2006. 527 pp.
16. Atkins P., Jones L. Chemical Principles: The Quest for Insight (4th ed.). W.H. Freeman and Company, 2008. 236 pp.
17. Belov G.V. Termodinamika. Part 2. M.: YUrajt, 2016. 384 pp.
18. Afanaseva O.S., Egorova G.F. Raschet sostava i temperatur evtektik trekh- chetyrekhkomponentnykh sistem po izvestnym harakteristikam dvuhkomponentnykh sistem // Vestn. Samar. gosud. tekhn. un-ta. Ser.: Fiz.-matem. nauki, 2011. № 1(25). P. 134–145.
19. Diagrammy plavkosti solevykh sistem: Spravochnik. Part IV. Trojnye sistemy. Pod red. V.I. Posypajko, E.A. Alekseevoj, N.A. Vasina. M.: Himiya, 1977. 392 pp.
20. Morgunova O.E., Trunin A.S. Elektronnyj generator fazovykh diagramm fiziko-himicheskikh sistem. SamGTU: Samara, 2006, 136 pp.

УДК 629.78

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ, МЕТОДОВ И СРЕДСТВ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ СОГЛАСОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЦЕЛЕВОГО ПРИМЕНЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ГРУППИРОВОК МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В.А. Галузин*

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: vladimir.galuzin@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена разработке моделей, методов и средств создания цифровой платформы согласованного планирования целевого применения гетерогенных орбитальных группировок малых космических аппаратов (МКА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Гетерогенность группировок МКА предполагает включение аппаратов ДЗЗ разного типа, от более простых и дешевых – до более точных и дорогих. Цифровая платформа ДЗЗ при этом отличается от обычной системы планирования тем, что в ней в качестве пользователей могут работать как потребители услуг ДЗЗ, так и производители МКА, предлагающие свои услуги на различных условиях, а также владельцы наземных станций, причем сами группировки могут включать в себя от нескольких десятков до сотен МКА. Такие группировки МКА создаются как ответ на многократное увеличение нагрузки на действующие системы ДЗЗ, вызванной все более возрастающей потребностью различных отраслей экономики. Суть разрабатываемых мультиагентных моделей, методов и алгоритмов планирования работы группировок МКА заключается в том, что решение задачи получается в результате проведения аукционоподобных переговоров между агентами заявок на съемку и агентами МКА, направленных на выявление и разрешение конфликтов путем взаимных уступок. Формируемое расписание работы группировки считается построенным при достижении состояния «конкурентного равновесия» на виртуальном рынке мультиагентной системы, когда ни один из агентов заявок и ресурсов более не может улучшить свое состояние. Новизна предлагаемого метода по сравнению с разработанным методом сети потребностей и возможностей (ПВ-сети) состоит в том, что в качестве ориентира для поиска идеального решения каждому агенту заявки дается возможность независимо оценить предельный глобальный лучший вариант своего размещения, к которому далее агент будет стремиться.

В статье предлагается постановка задачи и описание разработанного метода, позволяющего реализовать процессы обработки заявок на съемку большого числа объектов наблюдения, поступающих в реальном времени. Рассматриваются основные функции и архитектура разработанного прототипа цифровой платформы для управления группировками МКА, а также виды экранов пользовательского интерфейса. Кроме того, приведены результаты экспериментальных исследований, демонстрирующих эффективность разработанного мультиагентного метода при решении данной задачи по сравнению с традиционными методами и средствами.

* Владимир Андреевич Галузин, младший научный сотрудник НИС кафедры «Электронные системы и информационная безопасность».

Обсуждаются полученные результаты и перспективы дальнейшего развития и применения разработанного подхода как для решения сложных задач адаптивного управления группировками МКА в центрах управления полетами на Земле, так и для создания распределенной космической системы «Рой МКА» для работы в открытом космосе.

Ключевые слова: *малые космические аппараты, наземные станции, объекты наблюдения, дистанционное зондирование Земли, интеллектуальные системы управления, мультиагентные технологии, онтологии, базы знаний, адаптивное планирование, реальное время.*

Введение

Услуги по дистанционному зондированию Земли – одна из динамично развивающихся сфер космической отрасли, результаты деятельности которой находят все большее применение при решении различных задач, таких как обновление топографических карт, прогнозирование наводнений, мониторинг полей для сельского хозяйства, определение реального местонахождения морских судов и др. [1].

При этом, с одной стороны, наблюдается многократное увеличение количества поступающих заявок на съемку объектов наблюдения (ОН) и повышение требований к качеству, оперативности и эффективности съемки. С другой стороны, растет число предложений от разных производителей МКА, отличающихся своими функциональными и стоимостными возможностями. Примерами являются проекты компании Planet Lab, спутниковая группировка которых насчитывает более 200 действующих спутников Dove (Flock) и 13 спутников субметрового разрешения SkySat, проект компании BlackSky Global, орбитальная группировка которого состоит из 60 спутников ДЗЗ [2], программа создания спутниковой группировки «Сфера» от Роскосмоса на 600 МКА [3] и др. При этом современный технический прогресс делает разработку новых МКА доступной как для университетов, так и для предприятий малого и среднего бизнеса.

Для устранения возможной монополии на рынке, агрегации разрозненных ресурсов и повышения эффективности ДЗЗ предлагается создание цифровой платформы управления гетерогенными группировками МКА разных производителей. Такая платформа призвана выполнять функции «космического юбера» рынка ДЗЗ, позволяя потребителям через «одно окно» подавать запросы на съемку интересующих их ОН, согласованно планировать МКА и наземные станции приема-передачи информации (НС), переданные в управление платформе, и доставлять результаты ДЗЗ потребителями. Под согласованным планированием в данном контексте понимается процесс планирования, при котором итоговое расписание формируется на основе поиска баланса интересов множества конкурирующих и кооперирующихся между собой элементов системы, каждый из которых «оптимизирует» свою целевую функцию (например, заказ «хочет» быть максимально быстро исполненным или ресурс «хочет» быть максимально загруженным), но готов идти на переговоры и уступки ради достижения своих целей. Формируемая таким образом открытая распределенная система ДЗЗ (РС ДЗЗ) позволит повысить оперативность, гибкость, производительность, масштабируемость и надежность работы группировки как для потребителей, так и для поставщиков услуг, снизить транзакционные издержки.

Ключевой проблемой создания такого рода цифровой платформы становится решение задачи согласованного планирования заказов на имеющиеся ресурсы

ДЗЗ в реальном времени с учетом интересов, предпочтений и ограничений всех участников и на основе индивидуального подхода к планированию различных по своим ресурсам, возможностям и характеристикам МКА. Сложность решения поставленной задачи создания РС ДЗЗ для гетерогенных группировок МКА обусловлена высокой размерностью решаемой задачи, в частности при съемке площадных ОН, фрагменты которых могут при этом сниматься на разных витках разными аппаратами. Наконец, решение этой задачи требует адаптивного планирования в режиме реального времени, т. к. поток поступающих в платформу событий, таких как появление новых заявок на съемку ОН, ввод новых и вывод старых МКА из работы, отказ оборудования МКА, непрерывно вносит изменения в текущую ситуацию и требует динамической корректировки расписания работы МКА за приемлемое время.

Большинство существующих разработок, такие как SaVoir [4], STM [5], STK Scheduler [6] и т. д., представляют собой централизованные, монолитные, иерархические и последовательные решения. Данные системы лишь отчасти удовлетворяют вышеописанным требованиям, что делает их слабо применимыми при построении планов работ крупномасштабных РС ДЗЗ. Таким образом, возникает необходимость либо в серьезной доработке уже существующих программно-алгоритмических решений с учетом возникающих требований, либо в разработке новых подходов к планированию орбитальных группировок МКА, более глубоко учитывающих семантику предметной области.

В качестве одного из таких подходов можно представить расширенное применение мультиагентных технологий, идея которого описана в [7–9]. Их применение на данный момент уже хорошо зарекомендовало себя на практике в различных промышленных решениях [10], которые позволяют гибко и адаптивно производить синтез расписания по событиям в режиме, близком к реальному времени, учитывая индивидуальные особенности заказов и ресурсов. А лежащая в основе данного подхода модель акторных вычислений делает возможным создание высокопроизводительных, распределенных, отказоустойчивых решений, что в совокупности позволяет более эффективно управлять ресурсами РС ДЗЗ в сравнении с традиционными методиками. Таким образом, применение мультиагентного подхода к планированию заявок для крупномасштабных РС ДЗЗ позволяет удовлетворить все вышеуказанные требования.

Предлагаемый в данной работе подход развивает решение, предложенное в работах предшественников [11–13], путем усовершенствования архитектуры мультиагентной системы, а также введения дополнительных эвристик, позволяющих значительно уменьшить сложность аукционоподобных переговоров и комбинаторного перебора при поиске решения.

Статья имеет следующую структуру. Во первом разделе дается краткая постановка задачи планирования операций для многоспутниковой группировки ДЗЗ, во втором разделе рассматривается современное состояние исследований и разработок по данной проблеме. В третьем разделе приводится используемая модель данных с описанием основных классов, в четвертом разделе описывается разработанный метод адаптивного планирования. В пятом разделе рассматривается разработанный прототип сервиса планирования цифровой платформы для решения задач управления РС ДЗЗ, в том числе показаны функции, архитектура и виды экранов. В шестом разделе дается описание проведенных экспериментальных исследований. В заключении резюмируются основные полученные ре-

зультаты и обсуждаются перспективы развития и применения разработанного решения.

1. Задача управления орбитальной группировкой малых космических аппаратов ДЗЗ

1.1. Структура космической системы ДЗЗ

Рассмотрим основные компоненты моделируемой РС ДЗЗ. Система представляет собой совокупность двух сегментов: космического комплекса и наземного специального комплекса. На рис. 1 приведена ее упрощенная схема.

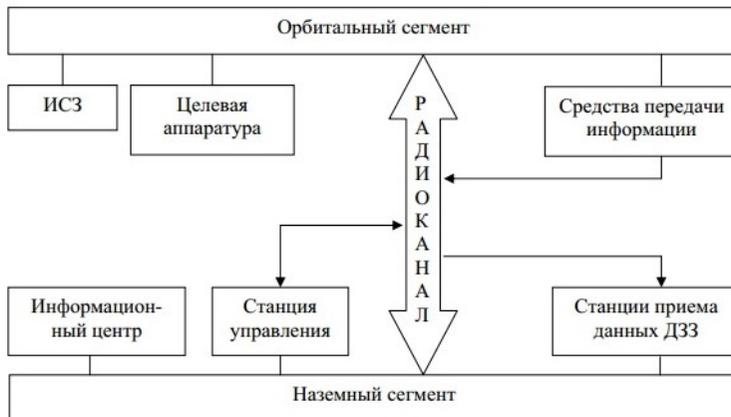


Рис. 1. Структура космической системы ДЗЗ

Космический комплекс выполняет функции по получению и передаче информации. В свою очередь, наземный специальный комплекс выполняет функции приема и обработки передаваемой информации. Космический комплекс состоит из орбитальной группировки МКА с установленной на них целевой аппаратурой ДЗЗ и бортовыми средствами передачи информации на Землю по радиоканалу.

В состав наземного комплекса входят следующие структурные элементы:

- центр управления работой орбитального сегмента, объединяющий ряд специальных станций;
- распределенная сеть НС для сбора данных ДЗЗ;
- информационные центры обработки и хранения данных ДЗЗ.

Приведенную структуру РС ДЗЗ можно представить в виде набора МКА $Sat = \{sat_i\}$, $i = \overline{1, L}$ и набора НС $GS = \{gs_j\}$, $r = \overline{1, G}$. Для возможности настройки модели МКА на аппараты разных производителей для каждого МКА $\{sat_i\}$ определим следующий набор изменяемых параметров: орбита O_i , предельные углы крена \maxRollAngle_i и тангажа \maxPitchAngle_i , а также параметры установленной на него съемочной аппаратуры (f – фокусное расстояние, $matx$ – размеры матрицы, минимальный угол возвышения солнца \minSunAngle_i , объем запоминающего устройства $memVol_i$). В свою очередь, для каждой НС gs_j имеется возможность задать географическое местоположение $coord_j$ параметрами уста-

новленной антенны (угол раствора и скорость приема данных). Состав МКА и НС может меняться с течением времени (вводятся в эксплуатацию новые МКА/НС, часть МКА/НС выходят из строя и т. д.). Каждый МКА может иметь ограничения на передачу информации на определенные НС (технического, организационного или какого-либо другого характера). Для НС и МКА могут быть указаны временные интервалы их недоступности.

Целевое функционирование РС ДЗЗ состоит в выполнении множества заявок на съемку ОН $R = \{r_p\}$, $p = \overline{1, P}$. ОН с точки зрения планирования работы целевой аппаратуры орбитальной группировки МКА можно разделить на точечные и площадные. Для заявки r_p может быть задан ее приоритет pr_p и множество ограничений (период, в который необходимо выполнить заявку $t_p = [t_p^{start}; t_p^{end}]$, допустимое линейное разрешение полученного снимка $\min R_p$ и $\max R_p$ и допустимый угол солнца $\min \text{SunAngle}_p$ и $\max \text{SunAngle}_p$). Состав множества заявок также заранее целиком не известен и изменяется в ходе работы системы (поступают новые заявки, изменяются параметры уже существующих и т. д.).

В рассматриваемой модели РС МКА выполняет две операции:

- съемка ОН r_p $imaging_p$, характеризующаяся интервалом выполнения $t_p^{imag} = [t_p^{imagStart}; t_p^{imagEnd}]$, углами крена $rollAngle_p$ и тангажа $pitchAngle_p$ МКА;
- проведение сеанса связи МКА с НС с целью передачи полученных данных на Землю $drop_p$, характеризующееся интервалом выполнения $t_p^{drop} = [t_p^{dropStart}; t_p^{dropEnd}]$ и скоростью передачи данных $baudRate_p$.

НС, в свою очередь, выполняет одну операцию – получение данных с МКА $receiv_j$, характеризующуюся интервалом выполнения $t_p^{receiv} = [t_p^{receivStart}; t_p^{receivEnd}]$.

1.2. Постановка задачи

Исходя из представленной модели РС ДЗЗ задачу планирования ее целевого функционирования можно определить следующим образом. Необходимо обеспечить адаптивное планирование поступающих заявок, перераспределяя их между МКА с целью повышения производительности РС ДЗЗ, получения снимков максимального качества, минимизации сроков выполнения отдельных заказов и обеспечения выполнения других критериев.

Целевая функция (ЦФ) РС ДЗЗ имеет вид:

$$OF = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^N OF_k \rightarrow \max ;$$

$$OF_k = \sum_{m=1}^M c_m F_m^k \rightarrow \max , \quad (1)$$

где OF – ЦФ системы; OF_k – ЦФ k -й заявки; S – общее количество заявок; N – количество размещенных заявок; M – количество критериев оптимизации;

c_m – весовой коэффициент m -го критерия оптимизации ($0 \leq c_m \leq 1$, $\sum_{m=1}^M c_m = 1$);

F_m^k – оценка m -го критерия оптимизации для k -й заявки.

В качестве критериев оптимизации выбраны минимизация времени съемки F_1^k и максимизация ее качества F_2^k :

$$F_1^k = \frac{t_k^{end} - t_k^{imagEnd}}{t_k^{end} - t_k^{start}},$$

$$F_2^k = \begin{cases} \frac{\min R_k - r_k}{\min R_k - \max R_k}, & \text{если } r_k \geq \max R_k; \\ \frac{r_k}{\max R_k}. \end{cases}$$

Примем, что на полученное решение накладывается ряд ограничений:

- выполнение условия наблюдаемости между МКА и ОН при съемке;
- наличие радиовидимости МКА и НС при передаче результатов съемки;
- наличие свободного места в бортовом запоминающем устройстве МКА;
- выполнение условия приоритизации заявок;
- согласованность последовательности моментов времени проведения операций;
- возможность одновременного выполнения МКА и НС не более одной операции.

2. Обзор источников

К настоящему времени имеется достаточно большое количество работ, посвященных решению проблемы планирования космической съемки. В них рассматривается планирование как работы одиночных КА, так и совместного функционирования орбитальных группировок. Также отличаются количество степеней свободы у рассматриваемых КА (от 1 до 3), характеристики наблюдаемых объектов (точечные, площадные и т. д.) и принимаемые во внимание дополнительные факторы (ограниченный объем запоминающего устройства КА, заряд батареи КА, возможная облачность и т. д.). Способы решения данной проблемы в основном опираются на классические и метаэвристические алгоритмы оптимизации. Также ведутся исследования в области применения методов машинного обучения. Разница в постановках задач в описании рассматриваемых подходов сильно затрудняет сравнение их производительности и эффективности.

Методы линейного программирования в качестве способа решения данной задачи рассматриваются в работах [14–16]. Проведенные авторами экспериментальные исследования показали хорошие результаты в решении данной проблемы применительно даже к спутниковой группировке. Однако используемые в них ЦФ предполагают оптимизацию лишь по одному критерию, а время работы растет экспоненциально с ростом размерности входных данных. В работах [17, 18] для поиска решения предлагается применение модифицированного муравьиного алгоритма, в работах [19, 20] – метод локального поиска для планирования съемки КА с несколькими степенями свободы, а в работах [21, 22] – генетический алгоритм для планирования съемки площадных ОН. Эвристические и метаэвристические алгоритмы показывают более высокую производительность в сравнении с традиционными методами оптимизации, однако применяемые в них эвристики требуют жесткой спецификации под конкретные условия задачи, а время работы и качество полученного решения могут сильно зависеть от

исходных данных. Попытки применения методов машинного обучения (МО) описываются в работах [23–25]. Данное направление имеет большой потенциал, т. к. позволяет производить обучение на данных без необходимости жесткого кодирования частей алгоритма. Однако на данный момент алгоритмы МО обладают ограниченной интерпретируемостью (например, отсутствует возможность явно указать ограничения) и требуют достаточно большого количества данных для обучения.

Кроме того, существует ряд работ, описывающих применение агентных подходов к решению задачи планирования ДЗЗ [26–28]. Процесс планирования, предложенный в работе [26], заключается во взаимодействии агентов полосы съемки и агентов КА и основывается на эвристиках из программирования в ограничениях. Приведенные авторами результаты сравнения с жадным алгоритмом, применяемым в настоящее время, показывают преимущества предлагаемого подхода. Однако производительность предлагаемого решения все еще остается недостаточной применительно к поставленной задаче. В работе [27] для распределения заказов на съемку ОН между спутниками в группировке рассматриваются механизмы рыночных аукционов. В рассматриваемой постановке задачи каждый спутник управляется отдельным центром миссии. Центры миссий координируют свое расписание, используя протоколы аукционов и предлагая цену за свободные заказы в зависимости от влияния на бортовой план и предполагаемую прибыль. В работе [28] затрагивается идея полностью автономного планирования на борту КА. Основные преимущества данного подхода предопределяются возможностями использования текущих фактических данных о состоянии КА и его ресурсов и возможностями реагирования на возникающие события в режиме реального времени. Однако, как отмечают авторы работы, с точки зрения практической реализации для создания полноценной мультиагентной системы из КА на орбите необходимо решить еще большое количество проблем, таких, например, как преодоление ограничений вычислительных возможностей бортовой аппаратуры КА, а также построение устойчивой коммуникационной системы из нескольких КА.

Рассмотренная ранее сложность и динамика рынка космических услуг в области ДЗЗ приводит к тому, что традиционные, централизованные, иерархические и последовательные методы, основанные на эвристических алгоритмах, не позволяют эффективно решить проблему адаптивного юбер-подобного управления ресурсами крупномасштабных РС ДЗЗ с приемлемым качеством и в требуемые сроки. В числе применяемых методов начинают появляться методы и алгоритмы на основе искусственного интеллекта и агентного подхода, связанные с учетом семантики предметной области, разбором конфликтов, недетерминированным поведением, самоорганизацией, адаптацией, работой в реальном времени. Однако, как отмечается в [28, 29], данные направления исследований еще недостаточно глубоко проработаны и отсутствуют целостные решения проблемы, пригодные для практической цифровой реализации.

3. Онтологическая модель данных ДЗЗ

В ходе разработки был проведен системный анализ и построена базовая онтология предметной области ДЗЗ, которая на текущем этапе была запрограммирована для повышения эффективности вычислений.

В разработанной онтологии используется модель данных, структура которой в виде диаграммы классов в нотации UML представлена на рис. 2.

Класс Resource описывает некоторый абстрактный ресурс, время использования которого необходимо запланировать. В качестве ресурсов выступают МКА (*Satellite*) и НС (*GroundStation*). Для ресурса могут быть заданы ограничения в виде графиков работы (*Calendar*) и интервалов недоступности (*AvailabilityConstraint*).

Класс *ObjectForShooting* представляет собой абстрактный объект наблюдения, съемку которого необходимо провести. Точечному ОН соответствует класс *PointObjectForShooting*, а площадному ОН – *AreaObjectForShooting*. Для каждого ОН создается ОС (*ShootingArea*).

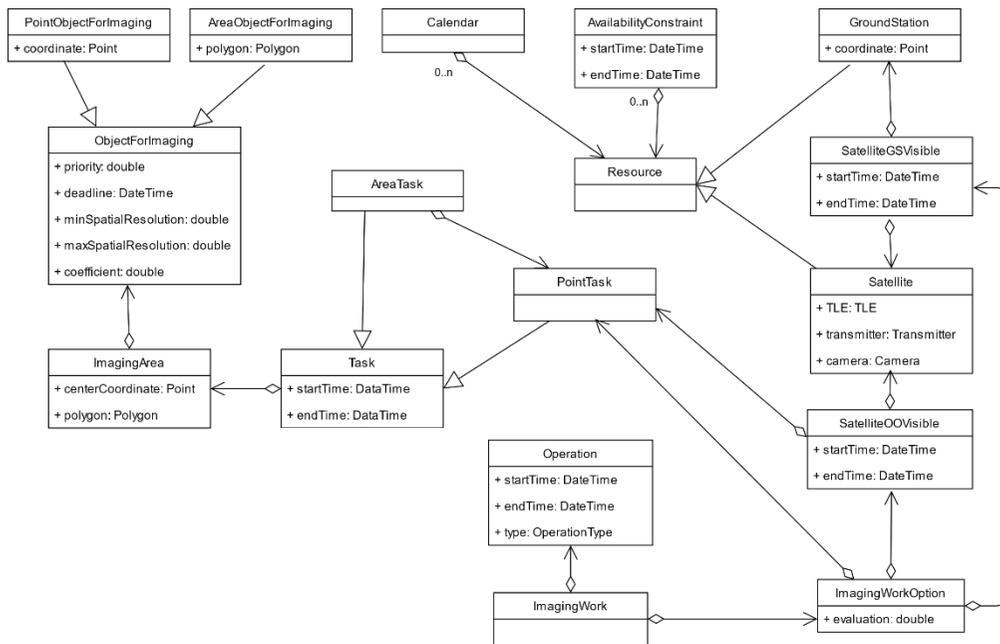


Рис. 2. Модель данных

Класс Task представляет собой задачу, выполнение которой необходимо запланировать. Задача на съемку площадного объекта (*AreaTask*) представляет собой совокупность задач на съемку точечных объектов (*PointTask*).

Для каждой задачи на съемку точечного объекта формируются варианты размещения (*ShootingWorkOption*), которые представляют собой сочетание видимости МКА-ОН (*SatelliteOSVisible*) и видимости КА-НС (*SatelliteGSVisible*), а также значение ЦФ (1). В процессе планирования для задачи выбирается один из вариантов размещения, на базе которого создается работа по съемке (*ShootingWork*). Работа по съемке состоит из трех операций (*Operation*): съемка, сброс и прием данных. Для хранения всех запланированных работ по съемке используется расписание (*Schedule*).

Предполагается, что указанные понятия и связывающие их отношения в дальнейшем будут реализованы в онтологии ДЗЗ, открытой для редактирования (расширения) пользователями.

4. Метод адаптивного планирования

На следующем этапе разработки был построен метод планирования гетерогенной группировки МКА, который призван обеспечить высокую адаптивность

планирования в сочетании с учетом индивидуальных критериев, предпочтений и ограничений всех участников платформы, а именно производителей МКА, которые могут брать временные интервалы для обслуживания аппаратов, станций приема и передачи данных, которые обслуживаются и продают свои услуги лишь в определенные дни и часы, потребителей ДЗЗ информации, которые выбирают между сроками, стоимостью и качеством съемки.

Предлагаемый процесс планирования заявок на съемку ОН, поступающих в платформу, состоит из следующих основных шагов (рис. 3):

1. Фильтрация заявок.
2. Матчинг (поиск соответствия) подходящих к каждой заявке МКА.
3. Разделение площадного ОН.
4. Расчет видимостей между МКА и ОН из заявки на указанном горизонте.
5. Формирование вариантов возможного размещения.
6. Бесконфликтное планирование.
7. Проактивное планирование (самоулучшение планов).

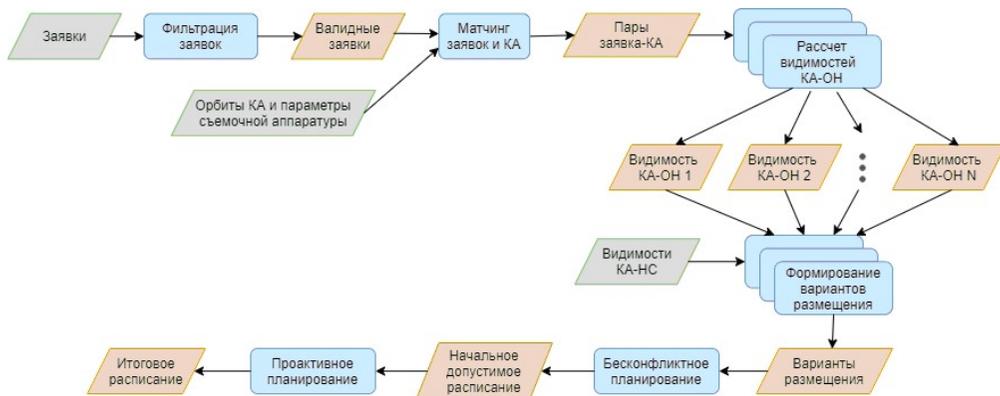


Рис. 3. Схема процесса планирования заявок на съемку в системе. Входные данные выделены зеленым цветом, методы обработки – синим, выходные данные – оранжевым

Перед началом расчетов все поступающие в систему заявки проходят проверку, в результате которой исключаются заявки с неполными или некорректными исходными данными. Затем выполняется поиск соответствия МКА и заявок в соответствии с указанными в заявках параметрами. После этого производится расчет видимостей между МКА и ОН из заявки на указанном горизонте. Далее выполняется генерация задач на съемку ОН на основе поступивших заявок. При этом в зависимости от типа ОН ему в соответствие создается одна или несколько областей съемки. Так, заявке на съемку точечного ОН ставится в соответствие одна область съемки, содержащая в себе данный объект, а для заявки на съемку площадного ОН осуществляется предварительное разбиение на множество смежных областей, соответствующих точечным ОН, полностью покрывающим заданный площадной ОН.

4.1. Метод расчета вариантов возможного размещения

На следующем этапе для каждой задачи выполняется расчет вариантов возможного размещения, реализованный на базе метода последовательных уступок между критериями оперативности и качества получаемой информации, задавае-

мых коэффициентом c_p . В качестве главного критерия выбран критерий оперативности, а исходя из формулы (1) граничное время для сброса результатов съемки x рассчитывается по формуле:

$$x = \frac{1}{c_p} (t_p^{end} - t_p^{start}) \times \left(1 - \frac{\min R_p - r_p}{\min R_p - \max R_p} \right) \times (1 - c_p) + t_p^{dropEnd}.$$

Псевдокод метода расчета вариантов возможного размещения задачи представлен на рис. 4.

Алгоритм 1 Расчет вариантов возможного размещения задачи

Вход: $task_j$ – задача, sa_j – область съемки, $SGSV$ – видимости КА-НС, $SOSV_j$ – видимости КА-ОН

Выход: IWO_j – варианты возможного размещения задачи $task_j$

```

1:  sort(SGSV, 'startTime', 'asc')
2:  sort(SOSVj, 'startTime', 'asc')
3:  x = taskj.endTime
4:  IWOj = []
5:  bestEvaluation = 0
6:  do
7:    sgsvk = SGSV.next()
8:    if sgsvk.startTime <= x
9:      do
10:       sosvp = SOSVj.next()
11:       if sosvp.endTime <= sgsvk.startTime
12:         iwo = createImagingWork(taskj, sgsvk, sosvp)
13:         IWOj.add(iwo)
14:         while SOSVj.hasNext() and sosvp.endTime <= sgsvk.startTime
15:           sort(IWOj, 'evaluation', 'desc')
16:           firstIWO = IWOj[0]
17:           if firstIWO.evaluation > bestEvaluation
18:             bestEvaluation = firstIWO.evaluation
19:             x = calcBoundarytaskj(firstIWO)
20:       while SGSV.hasNext() and sgsvk.startTime <= x
21:     return IWOj

```

Рис. 4. Псевдокод метода расчета вариантов возможного размещения задачи

Рассмотрим подробнее работу данного метода. На вход метода поступает задача $task_j$, для которой необходимо осуществить расчет вариантов возможного размещения, и область съемки sa_j , соответствующая данной задаче, а также предварительно рассчитанные видимости МКА-ОН $SOSV_j$ и МКА-НС $SGSV$. В начале работы метода выполняется сортировка видимостей МКА-ОН $SOSV_j$ и МКА-НС $SGSV$ по возрастанию времени начала соответствующего интервала (строки 1–2). Граничное время для сброса результатов съемки x принимается равным времени окончания планирования задачи $task_j.endTime$ (строка 3). Далее выполняется последовательный перебор видимостей МКА-НС $SGSV$ до тех пор, пока время начала очередной видимости $sgsv_k.startTime$ не превысит текущее граничное значение времени x (строки 6–20). На каждой итерации выполняется комбинация видимости МКА-НС $sgsv_k$ и предшествующих ей видимостей МКА-ОН $SOSV_j$ с последующим формированием на основе пары $sgsv_k$ и $sosv_p$ варианта размещения iwo (строки 9–14). В конце каждой итерации выполняется проверка, не превышает ли оценка новых найденных вариантов текущую лучшую оценку $bestEvaluation$ (строка 17). Если это утверждение истинно, выполняется пересчет граничного времени для сброса результатов съемки x , а $bestEvaluation$ принимает новое лучшее значение (строки 18–19). В ходе работы метода выстраивается по-

следовательность вариантов возможного размещения задачи $IWO_j = \{iwo_l\}$, $l = \overline{1, s}$, в начале которой стоит вариант размещения, расположенный в точке глобального оптимума ЦФ задачи $OF_k(1)$.

4.2. Метод бесконфликтного планирования

На этапе бесконфликтного планирования с помощью «жадного» алгоритма оптимизации строится начальное допустимое расписание, при этом уровень качества полученного расписания не имеет значения. Цель данного этапа – формирование начального состояния для последующего этапа проактивного планирования. Идея бесконфликтного планирования состоит в том, что заявки занимают первый свободный вариант, не пытаясь сместить уже размещенные.

Метод бесконфликтного планирования состоит из следующих шагов:

1. Список заявок упорядочивается и группируется по значению приоритета pr_p .

2. Для каждой группы заявок производится попытка их планирования, в ходе которой:

2.1. Для каждой заявки последовательно перебираются варианты ее возможного размещения:

2.1.1. Для очередного варианта осуществляется поиск конкретных интервалов выполнения операций съемки и сброса в пределах указанных интервалов видимостей, для которых действуют следующие условия:

– МКА и НС не выполняют в заданные интервалы съемки и сброса другие ранее запланированные операции;

– имеется достаточный объем свободного места в бортовом запоминающем устройстве МКА на интервале времени от начала съемки ОН до окончания передачи данных на НС.

2.1.2. Если такие интервалы найдены, формируется работа по съемке ОН. В противном случае алгоритм переходит к следующему варианту размещения п. 2.1.1.

4.3. Метод проактивного планирования

На этапе проактивного планирования полученное расписание оптимизируется с использованием мультиагентного подхода, который заключается в конкуренции и кооперации программных агентов, обладающих определенными возможностями или потребностями [4]. Программные агенты взаимодействуют посредством переговоров, в ходе которых путем взаимных компромиссов и уступок приходят к локально-оптимальному решению задачи.

В разработанном методе присутствуют два основных типа агентов: агент задачи, целью которого является занять наиболее выгодный для него вариант размещения в расписании, и агент сцены (в дальнейшем – агенты всех ресурсов), предназначенный для управления активностью агентов задач и взаимодействия с внешними системами. Агент задачи отвечает за совершение перестановок в расписании и обладает функцией удовлетворенности SF , позволяющей определить оценку текущей удовлетворенности его потребностей:

$$SF_k(iw_k) = 1 - (OF_k(iwo_k) - OF_k(iw_k)),$$

где SF_k – функция удовлетворенности агента; iwo_k – вариант размещения, расположенный в точке глобального оптимума ЦФ задачи; iw_k – текущая работа по съемке ОН.

Перед началом планирования для каждой задачи создается ее программный агент. Управление ходом планирования осуществляется при помощи агента сцены, который действует в соответствии с алгоритмом 2 (его псевдокод представлен на рис. 5).

Алгоритм 2 Проактивное планирование

Вход: *taskAgents* – агенты задач, *N* – максимальное число одновременно активных агентов задач
Выход: Оптимизированное расписание

```

1:   do
2:     if поступило событие изменения исходных данных
3:       обновить контекст планирования
4:     tasksQueue = создатьОчередь(taskAgents)
5:     sort(tasksQueue, 'evaluation', 'asc')
6:     while очередь агентов задач не пуста
7:       if число активных агентов задач >= N
8:         ожидать окончания проактивности одного из агентов
9:         taskAgent = tasksQueue.poll()
10:        if taskAgent.satisfaction < 1
11:          sceneAgent.sendMessage(taskAgent, "Начать
проактивность").then(proactiveResult =>
12:            if проактивность завершилась успешно
13:              updateEvaluation(proactiveResult.changedTasks)
14:              sort(tasksQueue, 'elevation', 'asc')
15:        while были перестановки расписании

```

Рис. 5. Псевдокод метода проактивного планирования

Данный метод работает следующим образом. Запуск агентов на проактивность осуществляется итерационно, при этом перед началом каждой итерации выполняется проверка наличия событий изменения в исходных данных (строка 2). Если такие события имеются, выполняется обновление контекста планирования путем применения пришедших событий к текущим исходным данным (строка 3). Затем полученный на вход перечень всех агентов задач *taskAgents* помещается в очередь, отсортированную по возрастанию значения функции удовлетворенности агентов (строки 4–5). Агенты задач последовательно извлекаются из очереди (строка 9), и если агент не полностью удовлетворен своим текущим положением в расписании (срока 10), то ему отправляется сигнал о начале проактивности (строка 11). Протокол переговоров агентов в ходе проактивного планирования представлен на рис. 6. После получения сообщения с результатами проактивности, если проактивность завершилась удачно, выполняется пересчет оценок всех задач, затронутых данной проактивностью, и обновление порядка задач в очереди (строки 12–14). Условием завершения проактивного планирования является отсутствие перестановок агентов задач на очередной итерации планирования, это означает достижение точки равновесия при переговорах и возможность выдачи готового решения (строка 15).

При получении сигнала о начале проактивности агент задачи выполняет попытку найти более выгодный для него вариант размещения по алгоритму 3 (рис. 7). В ходе проактивности агент задачи последовательно перебирает возможные варианты размещения лучше текущего, на котором запланирован (строки 2–16). На каждой итерации поиска он вначале рассчитывает максимально

возможную компенсацию за перемещение *compensation*, которую сможет предоставить конфликтующим с ним за размещение агентам задач (строка 4). Затем выполняется поиск конфликтов по размещению (строка 6), и если таковые имеются, выполняется попытка их разрешить, используя вычисленную компенсацию (строки 7–12). При этом каждому агенту конфликтующей задачи последовательно отправляется сообщение с просьбой найти другие интервалы размещения (строка 10). Тот, в свою очередь, при получении данного сообщения выполняет попытку найти для себя новый вариант размещения, используя представленную компенсацию по алгоритму 3. Если попытка разрешения конфликта завершилась успешно и агент конфликтующей задачи готов к перемещению, из общей компенсации *compensation* вычитается компенсация, требуемая данным агентом, конфликт помечается как разрешенный и удаляется из общего перечня конфликтов (строки 11–13). В противном случае выполняется переход к следующему возможному варианту размещения. После того как все конфликты разрешены, на основе данного варианта размещения создается работа по съемке и добавляется в расписание вместо предыдущей (строки 14–16).

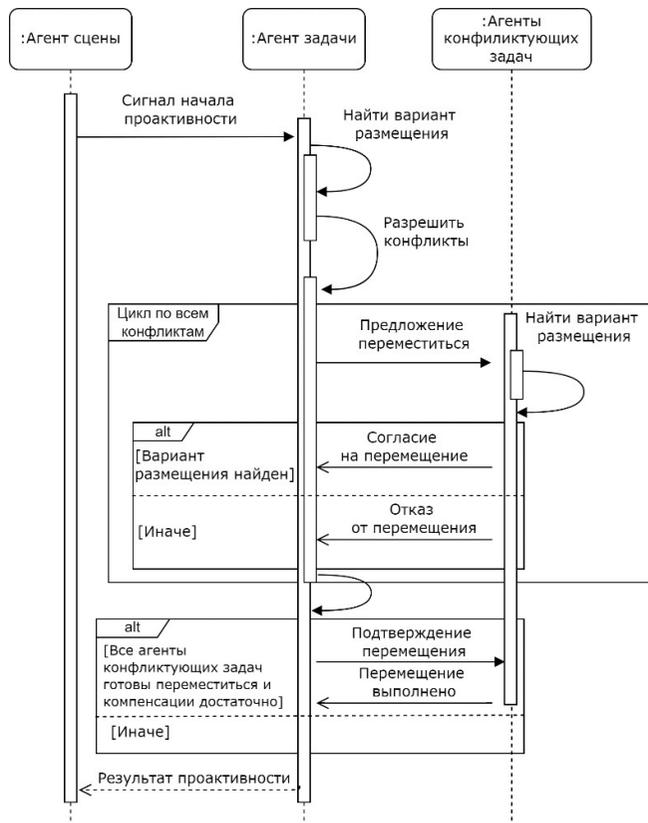


Рис. 6. Протокол переговоров агентов входе поиска нового варианта размещения на этапе проактивного планирования

По мере поступления в систему событий об изменении исходных данных для планирования часть решения, затронутая изменениями, адаптивно корректируется путем проведения новых переговоров между соответствующими агентами заказов без останова и перезапуска системы.

Алгоритм 3 Проактивность агента задачи

Вход: $taskAgent_j$ – агент j -й задачи, IWO_j – варианты возможного размещения j -й задачи, iw_j – текущая работа по съемке j -й задачи

Выход: iw_j – новая работа по съемке j -й задачи

```
1:   compensation = 1
2:   while IWOj.hasNext() and compensation > 0
3:     iwok = IWOj.next()
4:     compensation = iwok.evaluation - iwj.evaluation
5:     while compensation > 0
6:       conflicts = findConflicts(iwok)
7:       while conflicts.hasNext() and compensation > 0
8:         conflict = conflicts.next()
9:         conflictingTaskAgent = conflict.conflictingTaskAgent
10:        response = taskAgentj.sendMessage(conflictingTaskAgent, "Найди другой вариант для размещения", compensation)
11:        if вариант размещения найден
12:          compensation = compensation - response.compensation
13:          conflicts.remove(confp)
14:        if конфликты отсутствуют
15:          iwj = createImagingWork(iwok, taskj)
16:          addToSchedule(iwj)
17:        return iwj
```

Рис. 7. Псевдокод метода проактивности агента задачи

Разработанный метод позволяет адаптивно планировать работу группировки в реальном времени, относительно универсален, устойчив к изменениям условий в постановке задачи, хорошо распараллеливается.

5. Прототип сервиса планирования цифровой платформы для решения задач управления РС ДЗЗ

5.1. Функциональные возможности прототипа сервиса платформы

Разработанный прототип сервиса планирования предназначен для составления и адаптивного перестроения локально-оптимального плана выполнения задач по съемке точечных и площадных районов средствами гетерогенной группировки МКА при заданных критериях эффективности и технических характеристиках МКА и НС, принятой модели обстановки и внешней среды, а также для моделирования РС ДЗЗ при изменении ее состава и конфигурации.

Прототип обеспечивает следующие основные функции:

- загрузка исходных данных о составе и параметрах элементов РС ДЗЗ;
- загрузка заявок на съемку точечных и площадных ОН;
- составление локально-оптимального плана работы РС ДЗЗ (группировки МКА и НС) при заданном составе технических характеристик;
- адаптивное перестроение локально-оптимального плана работы РС ДЗЗ по событиям, изменяющим характеристики системы (состав МКА и НС, технических характеристик систем МКА и НС, добавление ограничений работы МКА и НС, изменение критериев планирования), а так же исходные данные по съемке точечных и площадных районов;
- визуальное моделирование процесса выполнения заявок ДЗЗ, приема и передачи данных на наземные станции;
- формирование графиков и диаграмм, отображающих результаты планирования;
- выгрузка полученного локально-оптимального плана работы РС ДЗЗ.

Система создается для эксплуатации в профильных подразделениях Центра управления полетами (ЦУП) и обеспечения поддержки принятия решений по планированию использования группировки МКА.

5.2. Архитектура прототипа

Разработанный прототип сервиса планирования целевого применения РС ДЗЗ имеет сетевую клиент-серверную архитектуру (рис. 8). Серверная часть системы написана на языке Java с применением фреймворка Spring [30]. Пользовательский интерфейс системы представляет собой одностраничное веб-приложение, написанное на языке JavaScript с применением фреймворка Vue.js [31]. Он позволяет получить удаленный доступ к ресурсам системы с любого устройства, обладающего связью с Интернет и допускающего использование браузера (ПК, ноутбуки, планшеты, мобильные телефоны). В качестве системы управления базами данных используется открытая кросс-платформенная СУБД PostgreSQL с расширением PostGIS [32] для хранения геопространственных данных.

Автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора информационного центра представляет собой интерфейс пользователя, через который осуществляется ввод заявок, управление ходом планирования, мониторинг ресурсов, просмотр отчетов и результатов планирования.

База данных обеспечивает долгосрочное хранение исходных данных и результатов планирования.

Модуль управления взаимодействием обеспечивает маршрутизацию и преобразование информационных потоков между системой и внешней средой.

Модуль учетной системы предназначен для взаимодействия других частей системы с сервером базы данных. Включает в свой состав *сервис обработки запросов на чтение и изменение данных*, целью которого является осуществление запросов к реляционной БД посредством ORM (Object-Relational Mapping), а также *сервис предоставления данных планировщику*, предназначенный для преобразования и предоставления данных, хранимых в БД, в формат данных, понятный планировщику. Кроме того, сервис предоставления данных планировщику отслеживает изменения в исходных данных по запросу *модуля планирования*.

Модуль планирования предназначен для адаптивного построения расписания и его перестроения при внешних изменениях исходных данных. В состав *модуля планирования*, реализуемого на основе мультиагентной технологии, входят следующие основные элементы:

- *адаптивный планировщик*, включающий в свой состав *хранилище агентов* – модуль системы, аккумулирующий созданных агентов, и *метод планирования* – набор алгоритмов, отвечающих за управление ходом планирования и поведение агентов в зависимости от текущего контекста;

- *сервис обработки событий*, отвечающий за взаимодействие планировщика с остальными частями системы посредством выполнения соответствующих действий в ответ на возникающие внешние и внутренние события;

- *сервис расчета вариантов размещения*, обеспечивающий генерацию пространства возможных вариантов поиска по запросу планировщика. В ходе выполнения расчетов он обращается к модулю баллистики для получения циклограмм видимостей МКА-ОН и МКА-НС.

Текущее расписание представляет собой объектную структуру, содержащую исходные данные для планирования и назначения определенных ресурсов на заявки, полученные в ходе планирования.

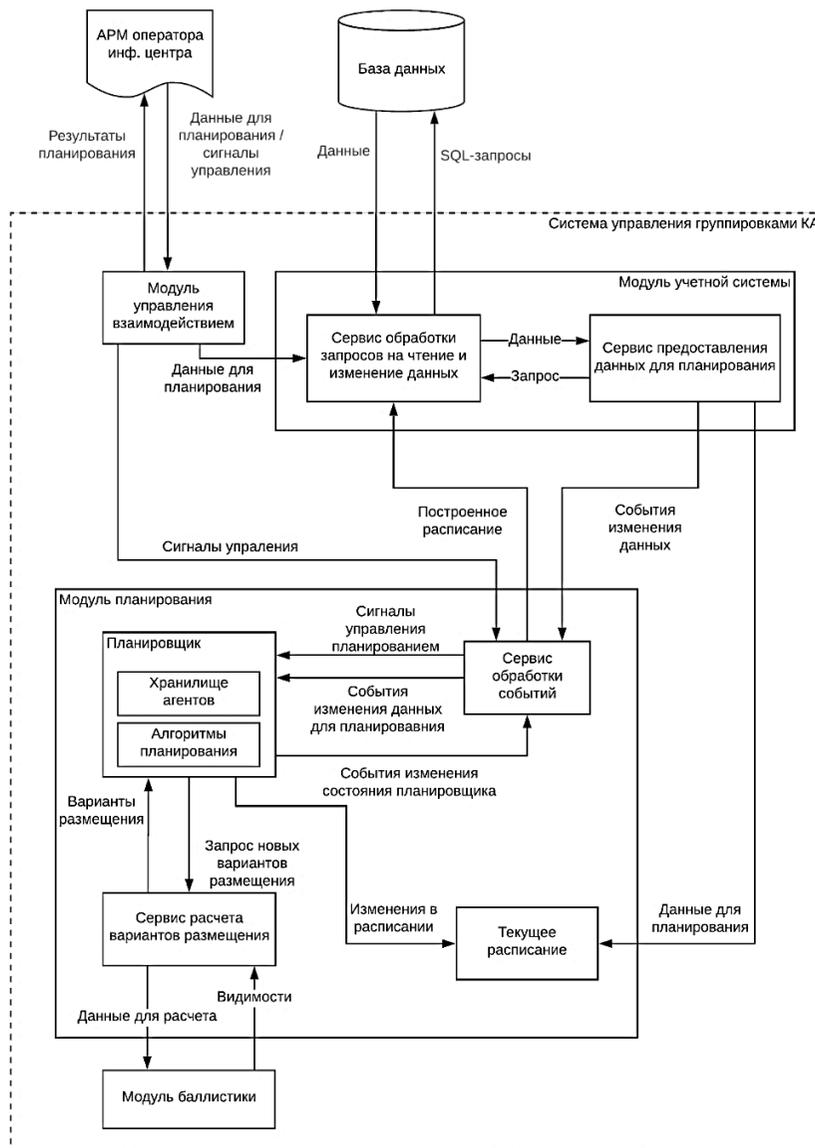


Рис. 8. Архитектура прототипа сервиса планирования

5.3. Пользовательский интерфейс прототипа

Пользовательский интерфейс системы представляет собой одностраничное веб-приложение. На рис. 9 представлен один из экранов с данными для планирования – экран НС. В системе присутствуют аналогичные экраны для МКА, заявок на съемку ОН, календарей и ограничений доступности ресурсов. Данные для планирования можно добавлять, изменять, удалять, при этом будет производиться динамическое перестроение расписания с учетом возникших изменений.

Наземные станции

Добавить 10 1

	Название	Скорость приема, ГБ/сек	Долгота, град	Широта, град	Высота, м	Угол раствора, град
<input type="checkbox"/>	Наземная станция приема 1	0.5	30	30	0	0
<input type="checkbox"/>	Наземная станция приема 2	0.5	-40	-40	0	0
<input type="checkbox"/>	Наземная станция приема 5	0.5	60	60	0	0
<input type="checkbox"/>	Наземная станция приема 3	0.5	-40	-40	0	0
<input type="checkbox"/>	Наземная станция приема 4	0.5	-50	-50	0	0

Рис. 9. Экран с данными для планирования

На рис. 10 представлен экран с результатами планирования операций для каждого МКА и НС, отображаемыми на временной шкале. В верхней части экрана на расположен график заполнения запоминающих устройств КА, демонстрирующий ограничения по памяти.

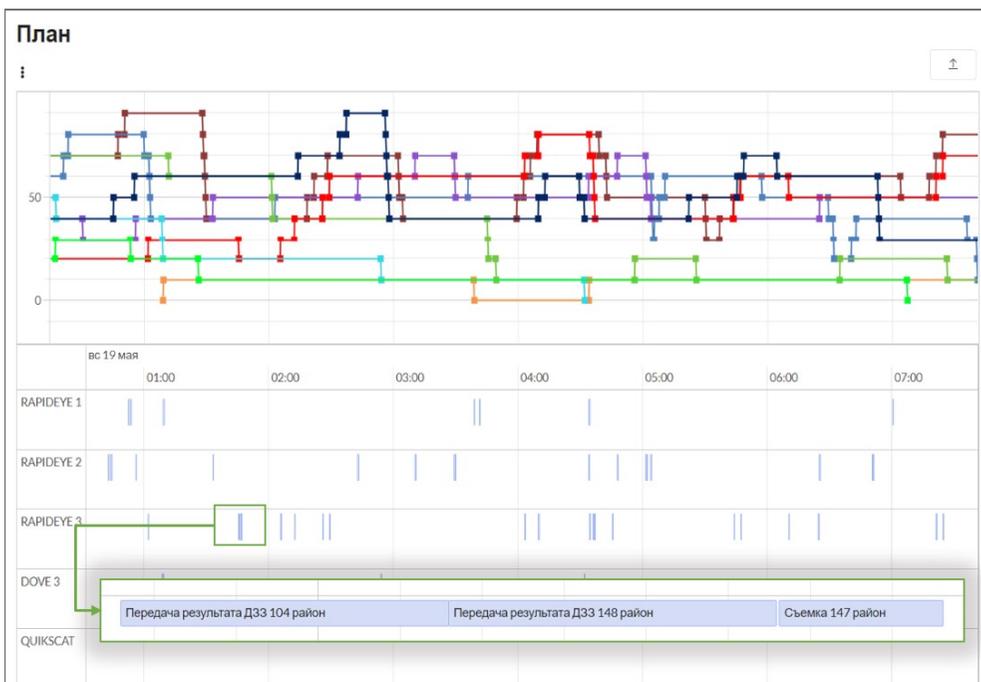


Рис. 10. Экран с результатами планирования

На рис. 11 представлен экран с физической моделью мира, в котором функционирует КС: трехмерная модель Земли, орбиты МКА, расположение ОН и НС. При этом моделируются процессы проведения съемки и передачи ее результатов. В нижней части экрана находится временная шкала, на которой отображается очередь ближайших запланированных операций, и виджет управления модельным временем.

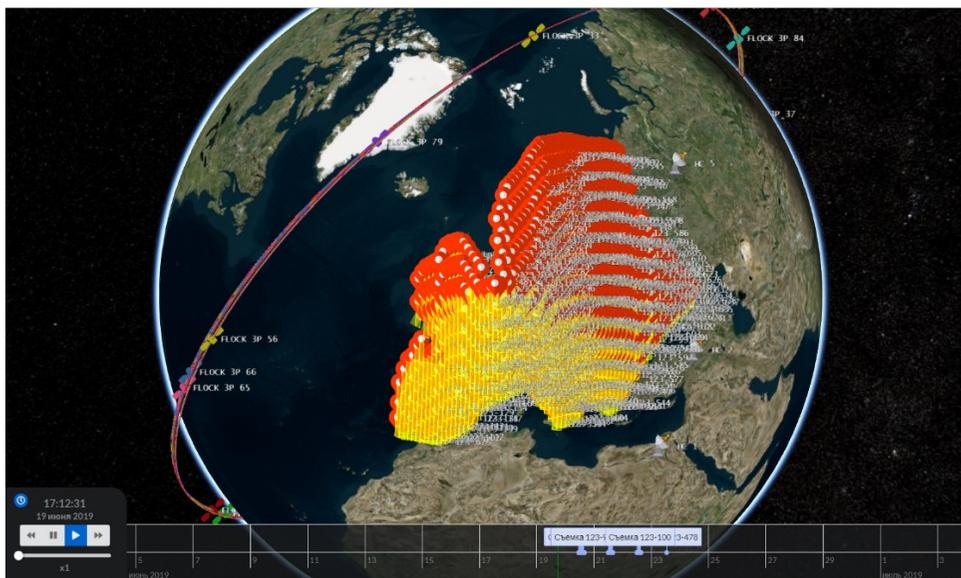


Рис. 11. Экран с физической моделью мира

На экране с аналитической информацией (рис. 12) отображается множество графиков и диаграмм, позволяющих дать оценку качества полученного расписания и проанализировать ход его построения. Среди них можно выделить:

- графики с историей изменения значения текущей и предельной целевой функции системы с момента начала планирования, при помощи которых можно оценить, насколько текущее значение ЦФ системы отличается от ее максимально возможного значения;
- столбчатую диаграмму распределения числа вариантов размещения лучше текущего, на которой запланирована задача, позволяющую проанализировать текущее положение задачи в расписании относительно всех возможных;
- столбчатую диаграмму распределения числа перестановок задач на каждой итерации планирования, при помощи которой можно проанализировать сходимость алгоритма планирования;
- столбчатую диаграмму распределения общего числа перестановок задачи в ходе планирования, позволяющую проанализировать, насколько активно менялось расписание в ходе планирования;
- круговую диаграмму, отображающую отношение удачных, неудачных проактивностей агента задачи и проактивностей, закончившихся с конфликтом, позволяющую оценить вычислительную эффективность проактивного алгоритма планирования.

6. Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований и оценки степени пригодности разработанной системы к решению задачи управления группировками МКА в реальном времени использовалась модель РС ДЗЗ, в состав космического комплекса которой входит группировка из 30 идентичных МКА; наземный комплекс системы представлен сетью из 10 НС. Моделировался случайный поток заявок на съемку объектов ДЗЗ, и результаты планирования подвергались автоматизированной обработке с участием экспертов.

Эксперименты проводились на ПК с ЦП Intel Core i7-3770 (4 ядра/8 потоков, 3.4 ГГц) и ОЗУ 8 Гб, под управлением операционной системы Windows 10.

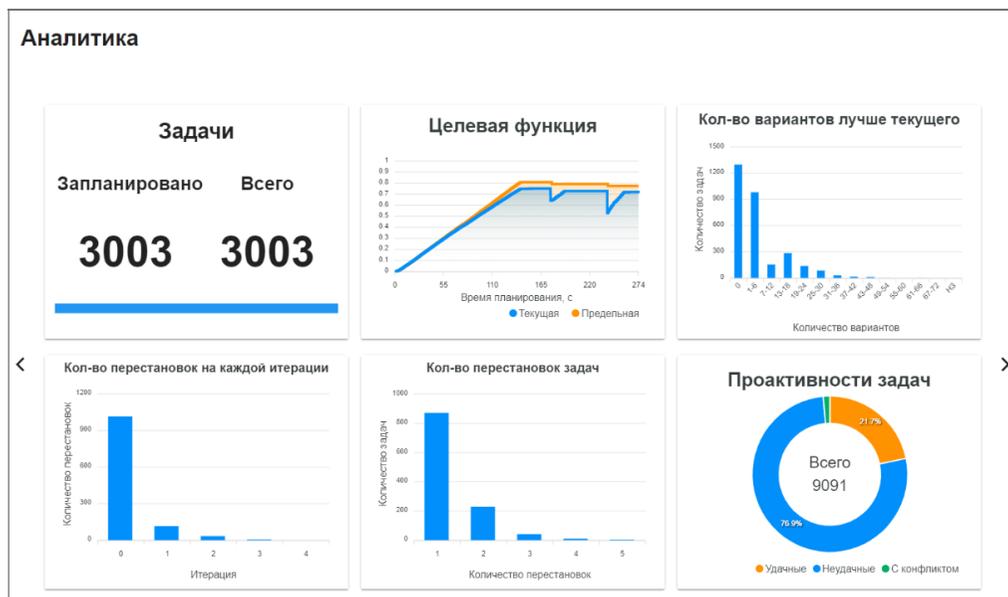


Рис. 12. Экран с аналитической информацией

6.1. Исследование адаптивности получаемого в прототипе расписания работы РС ДЗЗ

В данном исследовании оценивалась способность метода к адаптации расписания по «разрушающим» событиям, в частности по выходу из строя одного из МКА.

В качестве исследуемого параметра здесь рассматривалось время, затраченное на перепланирование, и качество полученного расписания. Для этого была проведена серия из 10 экспериментов, в ходе которых вначале планировалось выполнение 3000 заявок на съемку ОН, сгенерированных случайным образом по равномерному закону распределения в диапазоне от -70° до 70° по широте и от -180° до 180° по долготе. Модель РС ДЗЗ в данном эксперименте была представлена космическим комплексом «Конопус-В» корпорации ВНИИЭМ, состоящим из 5 КА («Канопус-В» № 1, № 3, № 4, № 5, № 6) [33], и сетью из 10 НС. После того как все заявки были успешно размещены в расписании, из системы исключался один из МКА и измерялись время, затраченное на перестроение расписания, изменения значения ЦФ системы и количества запланированных заявок.

Результаты экспериментов представлены в таблице.

Из результатов эксперимента видно, что выход из строя одного из МКА привел к резкому падению значения ЦФ системы в среднем на 0,1 и необходимости поиска новых вариантов размещения для 450 заявок. В ходе перестроения расписания на другие МКА было перепланировано 443 заявки, что составляет 98 % от числа заявок, которые были запланированы на удаленный МКА. В результате восстановления расписания значение ЦФ повысилось до 0,69, что меньше исходного всего на 0,04. Среднее время перепланирования при этом составило около 11 секунд. Таким образом, применение мультиагентного подхода при планиро-

вании позволяет оперативно, гибко и эффективно парировать возникновение внешних событий, приводящих к изменению условий решаемой задачи.

Результаты экспериментов по исследованию способности системы к адаптации расписания

№	Время перепланирования, с	После выхода из строя МКА		После перестроения расписания	
		Кол-во распланированных заявок	ΔЦФ	Кол-во перепланированных заявок	ΔЦФ
1	11	464	-0,11	460	0,07
2	10	448	-0,11	436	0,06
3	12	468	-0,11	464	0,09
4	13	427	-0,1	414	0,05
5	11	452	-0,1	447	0,07
6	12	515	-0,11	512	0,08
7	9	417	-0,1	408	0,04
8	10	437	-0,11	435	0,06
9	10	415	-0,07	409	0,05
10	11	461	-0,1	459	0,06

6.2. Анализ эффективности в сравнении с алгоритмами планирования, основанными на традиционных методах оптимизации

В данном исследовании проводился анализ эффективности разработанного метода в сравнении с алгоритмами планирования, основанными на традиционных методах оптимизации, таких как алгоритм имитации отжига, алгоритм Late Acceptance Hill Climbing (ЛАНС) и алгоритм Tabu Search, по качеству полученного расписания и временным затратам, необходимым на его составление. Приведенные алгоритмы оптимизации реализованы в открытом Java-фреймворке для планирования Optaplanner [34].

В ходе исследования проведена серия экспериментов, в которых моделировался случайный поток заявок на съемку объектов ДЗЗ. Количество заявок на съемку ОН изменялось от 100 до 20 000. Горизонт планирования в зависимости от числа заявок варьировался от 1 до 14 дней. При этом измерялось время, затраченное на составление плана, и значение ЦФ системы.

По результатам проведенных экспериментов построены графики зависимости значения ЦФ системы и времени планирования от количества заявок для различных алгоритмов планирования (рис. 13).

Результаты экспериментов показывают, что даже на задачах малой размерности ДЗЗ для группировки КА предлагаемый мультиагентный метод не уступает традиционным эвристическим алгоритмам, а с ростом числа планируемых заявок демонстрирует более высокую скорость построения расписания без потери в качестве, продолжая работать там, где классические методы уже работают плохо или вовсе не работают.

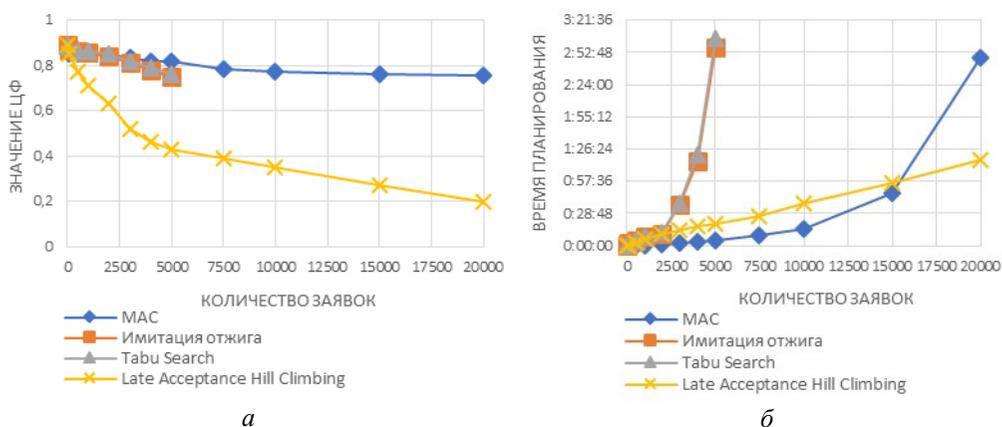


Рис. 13. Графики зависимости значения ЦФ (а) и времени планирования (б) от количества заявок

Заклучение

В статье рассмотрена постановка задачи и предложен метод решения проблемы создания сервиса адаптивного планирования операций для цифровой платформы управления крупномасштабной орбитальной группировкой МКА ДЗЗ на основе онтологий и мультиагентных технологий. Рассмотрены существующие подходы к планированию работы такой группировки, предложена архитектура системы и функции компонент, разработан метод планирования работы РС ДЗЗ и выполнена его реализация на языке Java.

Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали соответствие предлагаемого подхода требованиям, предъявляемым к методам и средствам планирования работы РС ДЗЗ. Так, общее время составления плана съемки для 20 тыс. объектов наблюдения составило порядка 3 часов, а время восстановления расписания, поврежденного выходом из строя одного из МКА, – менее 1 минуты.

Направления дальнейшего развития системы связаны с разработкой распределенного метода адаптивного планирования, позволяющего производить расчеты в вычислительных кластерах, а в перспективе – автономное планирование на борту МКА. Предполагается также введение онтологии с целью обеспечения более гибкой настройки применяемых правил построения расписания как в ЦУП на Земле, так и на борту МКА.

Предлагаемые методы и средства позволят перейти от прототипа к реальной системе управления крупномасштабными распределенными системами ДЗЗ, что может быть использовано, например, в рамках проектах «Сфера» Роскосмоса.

Ожидаемый системный эффект будет состоять в большей открытости, оперативности и гибкости выполнения заявок, снижении стоимости и рисков решения целевых задач, повышении производительности и живучести группировки, а также в повышении качества и эффективности решения целевой задачи группировки МКА для всех участников.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shimoda H. Remote Sensing Data Applications. In Handbook of Satellite Applications. 2016. P. 1–70.

2. *Kopacz J., Herschitz R., Roney J.* Small Satellites an Overview and Assessment // *Acta Astronautica*. Vol. 170, 2020. P. 93–105.
3. *Железняков А.Б.* Космическая деятельность стран мира в 2020 году // *Инновации*. 2020. № 11. С. 2–8.
4. SaVoir [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.taitussoftware.com/products/applications/savoir> (дата обращения 19.04.2022).
5. STM [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.stm.com.tr/en/our-solutions/satellite-and-aerospace> (дата обращения 19.04.2022).
6. AGI: STK Scheduler [Электронный ресурс] – URL: <https://www.agi.com/products/stk-specialized-modules/stk-scheduler> (дата обращения 19.04.2022).
7. *Belokonov I., Skobelev P., Simonova E., Travin V., Zhilyaev A.* Multiagent planning of the network traffic between nanosatellites and ground stations // *Procedia Engineering: Scientific and Technological Experiments on Automatic Space Vehicles and Small Satellites*. 2015, no. 104. P. 118–130.
8. *Skobelev P., Simonova E., Zhilyaev A., Travin V.* Multi-Agent Planning of Spacecraft Group for Earth Remote Sensing // *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Studies in Computational Intelligence*. 2016. Vol. 640. P. 309–317.
9. *Skobelev P., Travin V., Simonova E., Mishutin D., Galuzin V., Galitskaya A.* Multi-agent Planning System for Target Application of Earth Remote Sensing Space Systems for Solving Precision Farming Tasks // *In Proceedings of the 11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2019)*. 2019. Vol. 2. P. 647–654.
10. *Gorodetsky V., Skobelev P.* System engineering view on multi-agent technology for industrial applications: barriers and prospects // *Cybernetics and Physics*. 2020. Vol. 9, no. 1. P. 13–30.
11. *Vumtux В.А., Скобелев П.О.* Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // *Автометрия*. 2009. № 2. С. 78–87.
12. *Rzevski G., Skobelev P.* *Managing Complexity*. London-Boston: WIT Press. 2014.
13. *Грачев С.П., Жиляев А.А., Ларюхин В.Б., Новичков Д.Е., Галузин В.А., Симонова Е.В., Майоров И.В., Скобелев П.О.* Методы и средства построения интеллектуальных систем для решения сложных задач адаптивного управления ресурсами в реальном времени // *Автомат. и телемех*. 2021, № 11. С. 30–67.
14. *Wei-Cheng L., Da-Yin L., Chung-Yang L., Yong-Yao L.* Daily Imaging Scheduling of an Earth Observation Satellite // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 2005. Vol. 35, no. 2. P. 213–223.
15. *Wang J., Demeulemeester E., Qiu D.* A pure proactive scheduling algorithm for multiple earth observation satellites under uncertainties of clouds // *Computers & Operations Research*. 2016. Vol. 74. P. 1–13.
16. *Frank J., Do M., Tran T.* Scheduling Ocean Color Observations for a GEO-Stationary Satellite // *26th International Conference on Automated Planning and Scheduling*, AAAI Press, Cambridge, MA, 2016. P. 376–384.
17. *Iacopino C., Palmer P., Policella N., Donati A., Brewer A.* How ants can manage your satellites // *Acta Futura*. 2014, no. 9. P. 59–70.
18. *He L., Liu X., Xing L., Liu K.* Hierarchical scheduling for real-time agile satellite task scheduling in a dynamic environment // *Advances in Space Research*. 2019. Vol. 63, iss. 2. P. 897–912.
19. *Xiaolu L., Laporte G., Chen Y., He R.* An adaptive large neighborhood search metaheuristic for agile satellite scheduling with time-dependent transition time // *Computers & Operations Research*. 2017. P. 41–53.
20. *Peng G., Dewil R., Verbeeck C., Gunawan A., Xing L., Vansteenwegen P.* Agile earth observation satellite scheduling: An orienteering problem with time-dependent profits and travel times // *Comput. Oper. Res.* 2019. Vol. 111. P. 84–98.
21. *Niu X., Tang H., Wu L.* Satellite Scheduling of Large Areal Tasks for Rapid Response to Natural Disaster Using a Multi-Objective Genetic Algorithm // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2018. Vol. 28. P. 813–825.
22. *Hosseinabadi S., Ranjbar M., Ramyar S., Amel-Monirian M.* Scheduling a constellation of agile Earth observation satellites with preemption // *J. Qual. Eng. Prod. Optim.* 2017. Vol. 2, no. 1. P. 47–64.
23. *Peng S., Chen H., Du C., Li J., Jing N.* Onboard observation task planning for an autonomous Earth observation satellite using long shortterm memory // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 65118–65129.
24. *Song Y., Zhou Z., Zhang Z., Yao F., Chen Y.* A framework involving mec: imaging satellites mission planning // *Neural Comput. Appl.* 2019. Vol. 32, issue 19. P. 15329–15340.

25. *Du Y., Wang T., Xin B., Wang L., Chen Y., Xing L.* A data-driven parallel scheduling approach for multiple agile Earth observation satellites // *IEEE Trans. Evol. Comput.* 2020. Vol. 24. P. 679–693.
26. *Bonnet J., Gleizes M., Kaddoum E., Rainjonneau S., Flandin G.* Multi-satellite Mission Planning Using a Self-Adaptive Multi-agent System // In Proceedings of the 2015 IEEE 9th International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO '15). 2015. P. 11–20.
27. *Phillips S., Parra F.* A Case Study on Auction-Based Task Allocation Algorithms in Multi-Satellite Systems // AIAA 2021-0185. AIAA Scitech 2021 Forum. P. 0185.
28. *Picard G., Caron C., Farges J., Guerra J., Pralet C., et al.* Autonomous Agents and Multiagent Systems Challenges in Earth Observation Satellite Constellations // In Proceedings of the 20th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems (AAMAS '21). 2021. P. 39–44.
29. *Wang X., Wu G., Xing L., Pedrycz W.* Agile Earth Observation Satellite Scheduling Over 20 Years: Formulations, Methods, and Future Directions // *IEEE Systems Journal.* 2020. P. 1–12.
30. *Gutierrez F.* Pro Spring Boot 2: An Authoritative Guide to Building Microservices, Web and Enterprise Applications, and Best Practices. Apress. 2019. P. 511.
31. *Macrae C.* Vue.js: up and running: building accessible and performant web apps. O'Reilly Media, Inc. 2018.
32. *Schönig H.J.* Mastering PostgreSQL 13: Build, administer, and maintain database applications efficiently with PostgreSQL 13. Packt Publishing Ltd. 2020.
33. *Горбунов А.В., Ильина И.Ю., Саульский В.К.* Состояние и перспективы развития космических комплексов «Канопус-В» и «Метеор-М» // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы.* 2015. Т. 2. № 4. С. 14–19.
34. *De Smet G. et al.* Optaplanner user guide. Red Hat and the community. 2016.

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2021 г.

DEVELOPMENT OF MODELS, METHODS AND TOOLS FOR CREATING A DIGITAL PLATFORM FOR AGREED PLANNING OF HETEROGENEOUS GROUP OF SMALL SPACE SATELLITES FOR REMOTE EARTH SENSING

*V.A. Galuzin**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: vladimir.galuzin@gmail.com

Abstract. *The paper describes a development of models, methods and tools for creating a digital platform for coordinated planning of heterogeneous orbital constellations for Earth remote sensing, which can include from several dozens to hundreds of small satellites. These orbital constellations are created in response to the massive increase in the load on currently operating systems. New systems, in comparison with traditional single satellite, impose much more tough requirements on methods and means of planning, and only a few of the existing solutions can at least partially correspond to them. Thus, there is a need to develop new planning approaches that take into account the domain semantics more deeply. As one of such approaches, the paper presents expanded application of multi-agent technology. The essence of this approach lies in numerous negotiations between agents of imaging applications through mutual compromises and concessions. And the desired efficiency is achieved by searching for the global optimum for each application and using this information in a targeted search for a general solution for the entire system. The paper provides a problem statement of planning the operation of an orbital constellation for Earth remote sensing. Furthermore, it describes the developed method, which makes it possible to process applications for imaging observation objects in real time. The paper also presents results of experimental studies that demonstrate efficiency of the developed multi-agent method in solving this problem versus traditional approaches. The architecture of the developed system is proposed, describing the functions of the main modules and screens. The obtained results and prospects for further development and application of the developed approach are discussed both for solving complex problems of adaptive control of small satellite constellations in mission control centers on Earth, and for creating a distributed space system "Swarm of satellites" for operation in open space.*

Keywords: *satellite, ground station, object of observation, Earth remote sensing, intelligent control system, multi-agent technologies, ontology, knowledge base, adaptive planning, real time*

REFERENSES

1. Shimoda H. Remote Sensing Data Applications. In Handbook of Satellite Applications. 2016. P. 1–70.
2. Kpacz J., Herschitz R., Roney J. Small Satellites an Overview and Assessment // Acta Astronautica. Vol. 170, 2020. P. 93–105.
3. Zheleznyakov A.B. Cosmic activities countries of the world in 2020 // Innovacions. 2021, no. 11. P. 30–40.
4. SaVoir [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.taitussoftware.com/products/applications/savoir> (дата обращения 19.04.2022).
5. STM [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.stm.com.tr/en/our-solutions/satellite-and-aerospace> (дата обращения 19.04.2022).
6. AGI: STK Scheduler [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.agi.com/products/stk-specialized-modules/stk-scheduler> (дата обращения 19.04.2022).

* *Vladimir A. Galuzin, Junior Researcher.*

7. *Belokonov I., Skobelev P., Simonova E., Travin V., Zhilyaev A.* Multiagent planning of the network traffic between nanosatellites and ground stations // *Procedia Engineering: Scientific and Technological Experiments on Automatic Space Vehicles and Small Satellites*. 2015, no. 104. P. 118–130.
8. *Skobelev P., Simonova E., Zhilyaev A., Travin V.* Multi-Agent Planning of Spacecraft Group for Earth Remote Sensing // *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Studies in Computational Intelligence*. 2016. Vol. 640. P. 309–317.
9. *Skobelev P., Travin V., Simonova E., Mishutin D., Galuzin V., Galitskaya A.* Multi-agent Planning System for Target Application of Earth Remote Sensing Space Systems for Solving Precision Farming Tasks // *In Proceedings of the 11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2019)*. 2019. Vol. 2. P. 647–654.
10. *Gorodetsky V., Skobelev P.* System engineering view on multi-agent technology for industrial applications: barriers and prospects // *Cybernetics and Physics*. 2020. Vol. 9, no. 1. P. 13–30.
11. *Wittich V.A., Skobelev P.O.* The method of conjugate interactions for managing resource allocation in real time // *Autometry* 45(2). 2009. P. 78–87.
12. *Rzevski G., Skobelev P.* *Managing Complexity*. London-Boston: WIT Press, 2014.
13. *Grachev S., Zhilyaev A., Laryukhin V.* Methods and Tools for Developing Intelligent Systems for Solving Complex Real-Time Adaptive Resource Management Problems // *Automation and Remote Control*. 2021, 82(11). P. 1857–1885.
14. *Wei-Cheng L., Da-Yin L., Chung-Yang L., Yong-Yao L.* Daily Imaging Scheduling of an Earth Observation Satellite // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 2005. Vol. 35, no. 2. P. 213–223.
15. *Wang J., Demeulemeester E., Qiu D.* A pure proactive scheduling algorithm for multiple earth observation satellites under uncertainties of clouds // *Computers & Operations Research*. 2016. Vol. 74. P. 1–13.
16. *Frank J., Do M., Tran T.* Scheduling Ocean Color Observations for a GEO-Stationary Satellite // *26th International Conference on Automated Planning and Scheduling*, AAAI Press, Cambridge, MA, 2016. P. 376–384.
17. *Iacopino C., Palmer P., Policella N., Donati A., Brewer A.* How ants can manage your satellites // *Acta Futura*. 2014, no. 9. P. 59–70.
18. *He L., Liu X., Xing L., Liu K.* Hierarchical scheduling for real-time agile satellite task scheduling in a dynamic environment // *Advances in Space Research*. 2019. Vol. 63, iss. 2. P. 897–912.
19. *Xiaolu L., Laporte G., Chen Y., He R.* An adaptive large neighborhood search metaheuristic for agile satellite scheduling with time-dependent transition time // *Computers & Operations Research*. 2017. P. 41–53.
20. *Peng G., Dewil R., Verbeeck C., Gunawan A., Xing L., Vansteenwegen P.* Agile earth observation satellite scheduling: An orienteering problem with time-dependent profits and travel times // *Comput. Oper. Res.* 2019. Vol. 111. P. 84–98.
21. *Niu X., Tang H., Wu L.* Satellite Scheduling of Large Areal Tasks for Rapid Response to Natural Disaster Using a Multi-Objective Genetic Algorithm // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2018. Vol. 28. P. 813–825.
22. *Hosseinabadi S., Ranjbar M., Ramyar S., Amel-Monirian M.* Scheduling a constellation of agile Earth observation satellites with preemption // *J. Qual. Eng. Prod. Optim.* 2017. Vol. 2, no. 1. P. 47–64.
23. *Peng S., Chen H., Du C., Li J., Jing N.* Onboard observation task planning for an autonomous Earth observation satellite using long shortterm memory // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 65118–65129.
24. *Song Y., Zhou Z., Zhang Z., Yao F., Chen Y.* A framework involving mec: imaging satellites mission planning // *Neural Comput. Appl.* 2019. Vol. 32, issue 19. P. 15329–15340.
25. *Du Y., Wang T., Xin B., Wang L., Chen Y., Xing L.* A data-driven parallel scheduling approach for multiple agile Earth observation satellites // *IEEE Trans. Evol. Comput.* 2020. Vol. 24. P. 679–693.
26. *Bonnet J., Gleizes M., Kaddoum E., Rainjonneau S., Flandin G.* Multi-satellite Mission Planning Using a Self-Adaptive Multi-agent System // *In Proceedings of the 2015 IEEE 9th International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO '15)*. 2015. P. 11–20.
27. *Phillips S., Parra F.* A Case Study on Auction-Based Task Allocation Algorithms in Multi-Satellite Systems // *AIAA 2021-0185. AIAA Scitech 2021 Forum*. P. 0185.
28. *Picard G., Caron C., Farges J., Guerra J., Pralet C., et al.* Autonomous Agents and Multiagent Systems Challenges in Earth Observation Satellite Constellations // *In Proceedings of the 20th*

- International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems (AAMAS '21). 2021. P. 39–44.
29. *Wang X., Wu G., Xing L., Pedrycz W.* Agile Earth Observation Satellite Scheduling Over 20 Years: Formulations, Methods, and Future Directions // IEEE Systems Journal. 2020. P. 1–12.
 30. *Gutierrez F.* Pro Spring Boot 2: An Authoritative Guide to Building Microservices, Web and Enterprise Applications, and Best Practices. Apress. 2019. P. 511.
 31. *Macrae C.* Vue.js: up and running: building accessible and performant web apps. O'Reilly Media, Inc. 2018.
 32. *Schönig H.J.* Mastering PostgreSQL 13: Build, administer, and maintain database applications efficiently with PostgreSQL 13. Packt Publishing Ltd. 2020.
 33. *Gorbunov A.V., Ilina I.Yu., Saulsky V.K.* State and perspectives of space complexes “Kanopus-V” and “Meteor-M” development. Rocket-Space Device Engineering and Information Systems. 2015. Vol. 2, no. 4. P. 14–19.
 34. *De Smet G. et al.* Optaplanner user guide. Red Hat and the community. 2016.

УДК 681.5.013

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АДАПТАЦИИ ТИПОВЫХ ЗАКОНОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ФУНКЦИЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА

*Д.С. Лысенко**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: dmitry-lusenko@yandex.ru

***Аннотация.** Разработана и описана структура интеллектуальной системы адаптации типовых законов автоматического регулирования с функцией идентификации структуры и параметров объекта. Разработанная система решает комплекс взаимосвязанных задач: идентификация структуры и параметров объекта, расчет и выбор типа регулятора, определение в замкнутом контуре управления параметрических возмущений. Интеллектуальная система состоит из трех контуров: контур идентификации, контур проектирования САР, исполнительный контур. К задачам контура идентификации относятся: идентификация структуры и параметров объекта методом наблюдения временной характеристики объекта при ступенчатом воздействии на входе; определение наличия параметрического возмущения методом сравнительной оценки переходных процессов эталонной модели и реального объекта управления. По результатам идентификации структуры и параметров объекта проектируется регулятор – выполняется расчет параметров и выбор типа регулятора. Исполнительный контур представлен замкнутой системой управления. Инструментом реализации подсистемы идентификации и подсистемы проектирования регулятора были выбраны нейронные сети. В качестве прототипа объекта управления были выбраны типовые динамические звенья и их соединения. В статье приводятся: описание структуры интеллектуальной системы адаптации типовых законов регулирования, описание подсистем идентификации и проектирования регулятора, структурные и графические схемы, результаты моделирования.*

***Ключевые слова:** интеллектуальная система управления, теория управления, проектирование типовых регуляторов, расчет параметров ПИД-регулятора, идентификация структуры и параметров объекта, нейронные сети.*

Введение

Самым распространенным типом регулятора в системах автоматического управления технологическим процессом являются регуляторы на основе ПИД-законов [1–3]. ПИД-регуляторы получили распространение благодаря простоте построения и ясности функционирования. Необходимо отметить, что многие вопросы, связанные с проектированием САР на базе типовых регуляторов, исследованы недостаточно. Об актуальности и значимости этой проблемы свидетель-

* Дмитрий Сергеевич Лысенко, аспирант кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

ствуют, например, данные компании Honeywell, которая провела обследование 100 000 контуров регулирования на 350 предприятиях, принадлежащих различным отраслям промышленности. Согласно этим данным 49–63 % САР работают с плохими настройками [4, 5], в связи с чем повышение эффективности ПИД-регуляторов является актуальной научно-технической задачей.

Современное состояние микропроцессорной техники позволяет реализовать системы управления со сложной структурой. Назначением таких систем управления является комплексное решение взаимосвязанных задач: идентификация структуры и параметров объекта управления, проектирование и адаптация параметров регулятора, диагностика состояния объекта. Инструментом создания систем управления со сложной структурой могут выступать нейронные сети [6, 7].

Нейронные сети широко применяют для решения задач автоматического управления. В работе [8] на базе нейронных сетей был создан нелинейный аналог ПИД-регулятора. В работах [9, 10] нейронная сеть выступает в качестве оптимизатора параметров ПИ-регулятора. Работы [11, 12] посвящены синтезу нейроконтроллера с функцией предсказания. Применение нейронных сетей в задачах моделирования приводится в работах [13–15]. Авторы использовали нейронные сети как инструмент синтеза модели или как инструмент идентификации параметров традиционной модели. Применение нейронных сетей в задачах диагностики приводится в работах [16, 17]. Исследованию подходов к построению интеллектуальных систем для комплексного решения задач теории управления посвящены работы [18–20]. Однако область применения разработанных авторами методологий ограничивается электромеханическими системами.

Среди общепризнанных методов идентификации технологических объектов можно выделить рекуррентные [21–23] и частотные [24, 25]. При идентификации частотными методами необходимо сформировать испытательное воздействие. Как правило, такое воздействие нарушает нормальный режим работы объекта [25]. В отличие от идентификации частотными методами, идентификация рекуррентными методами позволяет находить значение коэффициентов модели через наблюдение управляемого и управляющего сигнала, не нарушая номинальный режим работы объекта. При этом идентификация параметров осуществляется для заданной структуры модели. Сравнительная оценка рекуррентных методов идентификации и области их применения приводятся в работе [23].

Цель работы – разработка и исследование интеллектуальной системы адаптации типовых законов автоматического регулирования.

При разработке интеллектуальной системы адаптации типовых законов автоматического регулирования должны быть решены следующие задачи:

- 1) идентификация структуры и параметров объекта управления;
- 2) проектирование типового регулятора – выбор типа регулятора и расчет параметров;
- 3) диагностика критического изменения параметров объекта.

Итогом решения всех задач стала интеллектуальная система адаптации типовых законов автоматического регулирования с функцией идентификации структуры и параметров объекта управления. Интеллектуальная система адаптации типовых законов автоматического регулирования состоит из трех контуров: контур идентификации, контур проектирования САР, исполнительный контур.

Для апробации разработанной системы в качестве прототипа объекта управления были выбраны типовые динамические звенья и их соединения. В работе использовались: апериодическое звено 1-го порядка, последовательное соедине-

ние апериодического звена 1-го порядка и звена чистого запаздывания, последовательное соединение двух апериодических звеньев 1-го порядка. Данные типовые звенья и их соединения часто используют для аппроксимации поведения теплоэнергетических установок [26, 27]. Разработанная система может быть применена для настройки параметров типового регулятора в контурах управления тепловых установок, таких как металлургические печи [1, 9], водогрейные котлы [28], паровые котлы [29].

В статье представлены этапы создания интеллектуальной системы адаптации типовых законов регулирования, структурные схемы, результаты моделирования. Система была реализована с помощью пакета MATLAB, библиотеки Neural Network Toolbox и Simulink.

Интеллектуальная система адаптации типовых законов автоматического регулирования

Разработанная интеллектуальная система адаптации типовых законов автоматического регулирования состоит из трех контуров: контур идентификации, контур проектирования САР, исполнительный контур. Структурная схема интеллектуальной системы адаптации типовых законов автоматического регулирования приведена на рис. 1.

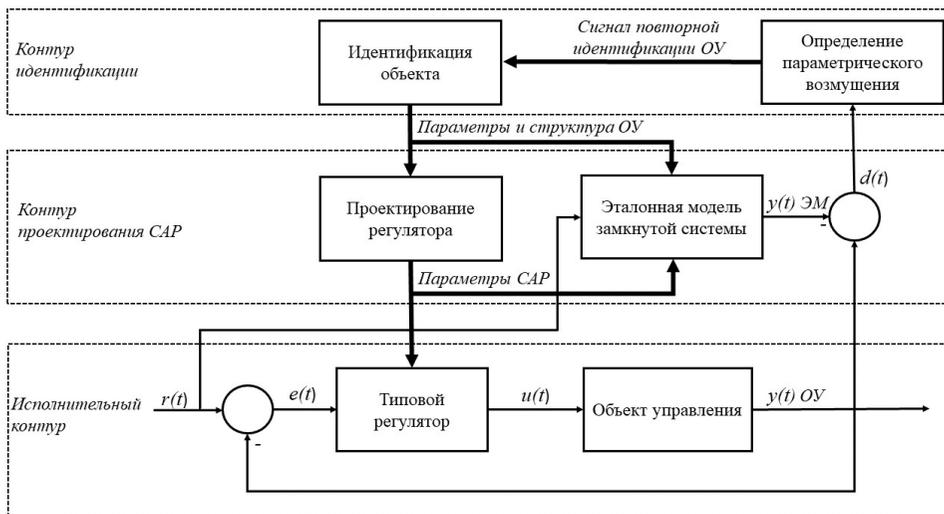


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной системы адаптации типовых законов автоматического регулирования: $r(t)$ – заданное значение управляемой величины; $e(t)$ – отклонение текущего значения управляемой величины от заданного; $u(t)$ – управляющее воздействие; $y(t)$ ОУ – текущее значение управляемой величины – выход объекта управления; $y(t)$ ЭМ – текущее значение выхода эталонной модели; $d(t)$ – отклонение текущего значения управляемой величины от значения выхода эталонной модели замкнутой системы

Контур идентификации. В задачи контура идентификации входят идентификация структуры и параметров объекта управления, диагностика недопустимого изменения параметров объекта в процессе эксплуатации.

Блок «Идентификация объекта». Данный блок служит для идентификации структуры и параметров объекта управления. Существенной особенностью при оценке точности временной характеристики является выбор входного воздействия с заранее определенными свойствами, что, естественно, возможно лишь при проведении активного эксперимента [30]. Среди предложенных решений практическое применение получили сигналы, принимающие только два значения $(-a, +a)$ – ступенчатое воздействие [31–33]. Такой сигнал легко реализуем и, как правило, не нарушает нормального режима работы объекта [30]. Структурная схема блока «Идентификация объекта» приводится на рис. 2.

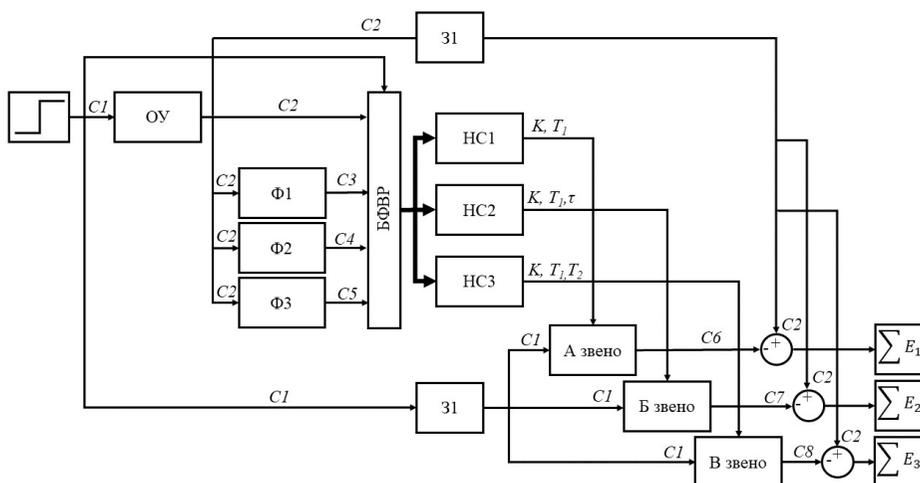


Рис. 2. Структурная схема блока «Идентификация объекта»: $C1$ – входной сигнал – ступенчатое воздействие; ОУ – объект управления; $C2$ – сигнал выхода объекта управления; $\Phi1$ – $\Phi3$ – фильтры Баттерворта; $C3$ – $C5$ – сигнал выхода объекта управления, пропущенный через фильтры $\Phi1$ – $\Phi3$; БФВР – блок формирования временных рядов; НС1–НС3 – нейронные сети; K – коэффициент передачи; T_1 , T_2 – постоянные времени; τ – транспортная задержка; $C6$ – сигнал выхода аperiodического звена 1-го порядка; $C7$ – сигнал выхода аperiodического звена 1-го порядка и звена чистого запаздывания; $C8$ – сигнал выхода аperiodического звена 2-го порядка; 31 – временная задержка сигналов $C1$, $C2$; E_1 , E_2 , E_3 – суммарные ошибки рассогласования между динамическим звеном и объектом управления

После подачи ступенчатого воздействия на вход объекта управления ($C1$) происходит активация блока, формирующего временные ряды (БФВР). Входами блока БФВР являются сигнал с выхода объекта управления ($C2$) и сигналы с выхода фильтров ($C3$ – $C5$). В работе использовались три фильтра Баттерворта первого порядка с разной частотой среза. Блок формирует временные ряды с заданным интервалом и числом отсчетов. Временные ряды сигналов ($C2$ – $C5$) подаются на входы нейронных сетей (НС1–НС3). Каждая из нейронных сетей была обучена идентифицировать параметры только одного звена. Нейронная сеть (НС1) – аperiodическое звено 1-го порядка, А-звено. Нейронная сеть (НС2) – последовательное соединение аperiodического звена 1-го порядка и звена чистого запаздывания, Б-звено. Нейронная сеть (НС3) – последовательное соединение двух

апериодических звеньев 1-го порядка, В-звено. Структура динамических звеньев была определена изначально. В результате наблюдения временных рядов каждая нейронная сеть рассчитывает параметры динамического звена (коэффициент передачи K ; постоянные времени T_1, T_2 ; время запаздывания τ). Результат расчета присваивается соответствующему динамическому звену.

После идентификации параметров динамических звеньев выполняется процедура идентификации структуры объекта. На вход динамических звеньев подается сигнал (С1). Сигналы (С1, С2) имеют временную задержку (З1), которая равна числу тактов, заданному в блоке БФВР. Введение временной задержки обусловлено необходимостью поэтапного выполнения процедуры идентификации параметров и структуры объекта. После происходит сравнение временных характеристик объекта управления (С2) и динамических звеньев (С6–С8). Для каждого из динамических звеньев рассчитывается ошибка рассогласования на текущем временном такте. Выбор структуры объекта управления происходит по минимальному значению ошибки рассогласования E_1, E_2, E_3 за определенное количество тактов:

$$E = \sum_{i=1}^n e_i,$$

где E – ошибка рассогласования; n – количество временных тактов; e_i – ошибка рассогласования на каждом временном такте.

При реализации блок «Идентификация объекта» имел следующие параметры. Сигнал (С1) – ступенчатое воздействие. Блок БФВР: длина временного ряда для каждого сигнала (С2–С5) была равна 50 тактов. Общее количество данных, на основании которых нейронные сети выполняли процедуру идентификации параметров, – 200 срезов. Задержка (З1) была равна 50 тактам. В работе использовались три двухслойные нейронные сети прямого распространения (рис. 2, НС1–НС3). В ходе эксперимента было установлено, что на основании данных одного входа – сигнала с выхода объекта управления – нейронная сеть не может точно идентифицировать параметры объекта управления. При тестировании ошибки идентификации имели неприемлемые значения. Было решено расширить размерность входного вектора. В схему были введены фильтры (рис. 2, Ф1–Ф3). Частота среза фильтров $\omega_{cp} = 0.0031, 0.0079, 0.0127$ Гц. Частота среза фильтра подобрана экспериментально. Применение нейронных сетей с расширенным входным вектором снизило ошибку идентификации.

Были сформированы две независимые выборки данных. Первая выборка использовалась для обучения нейронных сетей. Вторая выборка использовалась для верификации нейронных сетей после обучения. Количество наборов и вариаций параметров передаточной функции в выборках отличалось. При формировании обучающей и тестовой выборки вариации параметров передаточной функции изменялись случайным образом в заданном диапазоне значений. Диапазон изменения параметров передаточных функций:

А-звено: K от 1 до 25; T_1 от 1 до 50;

Б-звено: K от 1 до 25; T_1 от 1 до 50; τ от 5 до 25;

В-звено: K от 1 до 25; T_1 от 25 до 50; T_2 от 1 до 24.

Единицы измерения постоянных времени и транспортной задержки задаются относительно времени квантования.

В качестве алгоритма обучения нейронных сетей была выбрана байесовская регрессия. Данные реализации нейронных сетей приводятся в табл. 1.

На рис. 3–5 приводится распределение ошибки идентификации параметров динамических звеньев. В табл. 2 приводятся значения средней и максимальной ошибки идентификации.

Таблица 1

Данные реализации нейронных сетей

Параметры НС	Размер обучающей выборки, вариаций	Распределение данных при обучении (тренировочные/валидационные/тестовые), %	Кол-во нейронов в скрытом/выходном слое
НС1, А-звено	150	70/15/15	20/2
НС2, Б-звено	250	50/25/25	29/3
НС3, В-звено	250	60/20/20	30/3

Таблица 2

Значения средней и максимальной ошибки идентификации

Параметры	Размер тестовой выборки	K	T_1	T_2	τ
НС1, А-звено	100 вариаций	Сред.: 0.67 Макс.: 4.42	Сред.: 1.21 Макс.: 9.67	–	–
НС2, Б-звено		Сред.: 0.75 Макс.: 5.62	Сред.: 1.85 Макс.: 19.1	–	Сред.: 2.21 Макс.: 10.9
НС3, В-звено		Сред.: 0.63 Макс.: 2.12	Сред.: 3.54 Макс.: 10.2	Сред.: 1,81 Макс.: 5,9	—

При тестировании системы идентификации параметров использовались данные тестовой выборки. Общее количество тестов было равно 100 для каждого звена. В большинстве тестов для всех динамических звеньев ошибка идентификации коэффициента передачи (K) и постоянной времени (T_1) была меньше 1 и 5 соответственно. Для аperiодического звена 2-го порядка ошибка идентификации постоянной времени (T_2) была меньше 4 в 94 тестах из 100. Ошибка идентификации транспортной задержки (τ) была меньше 6. Количество тестов, в которых ошибка идентификации параметров объектов была больше описанных значений, – незначительно.

Выбросы при идентификации параметров являются единичными случаями и обусловлены неспособностью нейронных сетей идентифицировать конкретные вариации параметров передаточной функции. В обучающей выборке было недостаточно схожих вариаций, на основании которых нейронные сети смогли бы корректно рассчитать параметры передаточной функции. Решением проблемы может быть увеличение данных обучающей выборки для нейронных сетей.

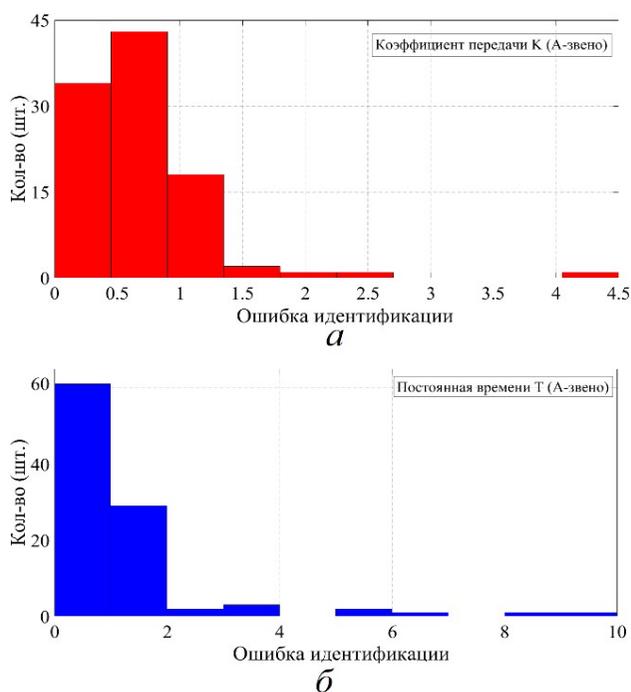


Рис. 3. Распределение ошибки идентификации параметров А-звена:
 a – коэффициент передачи; b – постоянная времени

Контур проектирования САР. В задачи контура входит выбор типа и расчет параметров типового регулятора.

Блок «Проектирование регулятора». После процедуры идентификации объекта управления выполняется процедура проектирования регулятора. Инструментом реализации блока «Проектирование регулятора» были выбраны нейронные сети. В работе использовались три нейронные сети прямого распространения. Каждая нейронная сеть реализует расчет коэффициентов регулятора для конкретного динамического звена по его параметрам. Работы [34, 35] посвящены вопросам выбора типа регулятора в зависимости от типа динамического звена. Для апериодического звена 1-го порядка выбран ПИ-регулятор НС4. Для последовательного соединения апериодического звена 1-го порядка и звена чистого запаздывания выбран ПИ-регулятор НС5. Для апериодического звена 2-го порядка выбран ПИД-регулятор НС6. Обучающая выборка для нейронных сетей была сформирована на основе данных автоматического расчета параметров регулятора. Для расчета использовалась функция PIDTUNE пакета прикладных программ MATLAB. Основным критерием качества переходного процесса был выбран запас устойчивости замкнутой системы управления. При расчете параметров регулятора требуемый запас устойчивости по фазе φ был задан 60° для всех структур моделей объектов. Количество пар «параметры объекта – настройки регулятора», включенных в обучающую выборку для каждой из нейронных сетей (НС4–НС6), было равно 250.

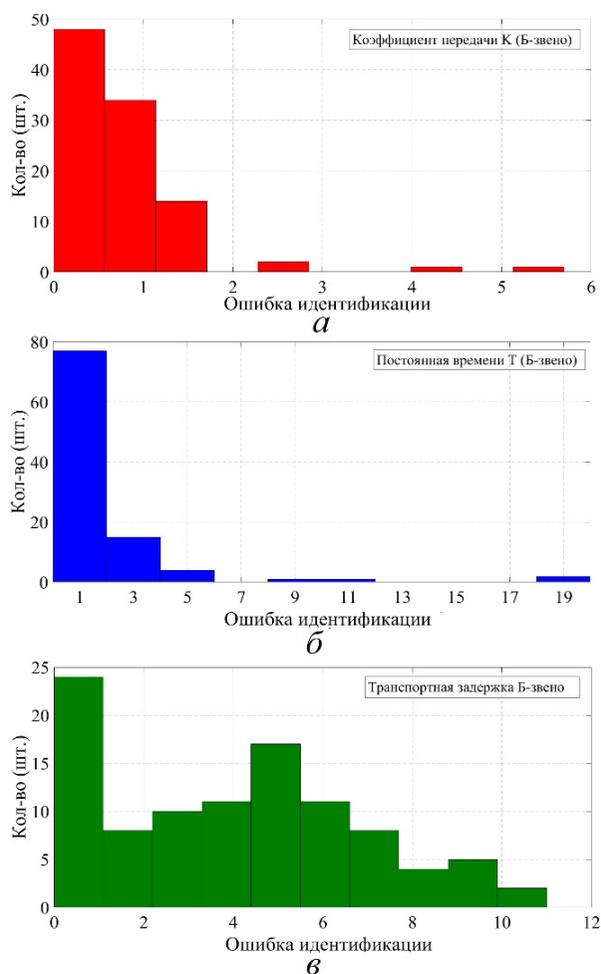


Рис. 4. Распределение ошибки идентификации Б-звена:
 a – коэффициент передачи; b – постоянная времени; v – транспортная задержка

В качестве входного вектора нейронные сети используют ранее идентифицированные параметры динамического звена. Выходной вектор нейронных сетей – коэффициенты регулятора. В качестве алгоритма обучения нейронных сетей была выбрана байесовская регрессия. Данные реализации нейронных сетей для блока «Проектирование регулятора» приведены в табл. 3. Значения параметров и структура регулятора передаются регулятору исполнительного контура.

Таблица 3

Данные реализации нейронных сетей для блока «Проектирование регулятора»

НС/параметры	Распределение данных при обучении (тренировочные/валидационные/тестовые), %	Кол-во нейронов в скрытом/выходном слое
НС1, А-звено	70/15/15	10/2
НС2, Б-звено	60/20/20	15/2
НС3, В-звено	60/20/20	21/3

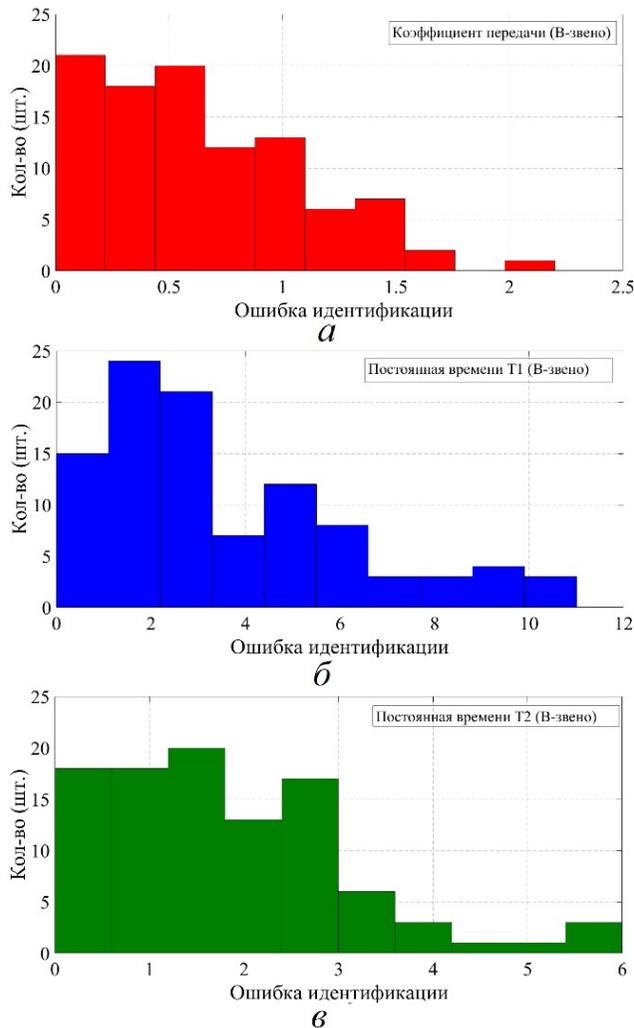


Рис. 5. Распределение ошибки идентификации параметров В-звена:
 a – коэффициент передачи; b – постоянная времени T_1 ; v – постоянная времени T_2

Блок «*Определение параметрического возмущения*». После завершения процедуры проектирования регулятора, когда выбрана структура и рассчитаны параметры регулятора, происходит настройка регулятора реальной САР, а также создание эталонной модели САР, которая рассчитывается в темпе процесса параллельно с реальной системой регулирования. Фактически эталонная модель выступает как модель «нормального» состояния. В процессе эксплуатации параметры реальной системы изменяются. Параметры эталонной модели остаются постоянными на всем интервале времени. Оценивая рассогласование между выходными сигналами эталонной модели и реальной системы, можно сделать вывод о наличии параметрического возмущения.

Определение параметрического возмущения происходит по суммарной ошибке рассогласования за определенное количество тактов. Если суммарная ошибка превышает критическое значение – наблюдается параметрическое возмущение. Если суммарная ошибка не превышает критического значения – пара-

метрическое возмущение отсутствует. В случае, когда в системе наблюдается параметрическое возмущение, – функция инициализирует процедуру повторной идентификации параметров объекта. Когда параметрическое возмущение отсутствует, система работает штатно.

Исполнительный контур. Контур представлен замкнутой системой управления с типовым регулятором.

Вычислительный эксперимент

Для апробации разработанной системы в качестве объекта управления было выбрано последовательное соединение двух апериодических звеньев 1-го порядка со следующими параметрами:

$$W(s) = \frac{8}{42s + 1} * \frac{1}{5s + 1}.$$

Идентификация параметров объекта управления. После наблюдения динамики выходной величины объекта управления в течение 50 тактов каждая из нейронных сетей идентифицировала параметры динамических звеньев. Результаты идентификации параметров динамических звеньев приводятся в табл. 4.

Таблица 4

Результаты идентификации параметров динамических звеньев

НС/параметры	Результат идентификации параметров динамических звеньев				Результат идентификации структуры ОУ
	K	T_1	T_2	τ	E_1, E_2, E_3
НС 1, А-звено	8.7	47	–	–	27.9
НС 2, Б-звено	12,8	56	–	6.5	21.8
НС 3, В-звено	8.1	44	6.1	–	7.7

Идентификация структуры ОУ. Идентифицированные параметры были присвоены соответствующим динамическим звеньям. Далее происходит сравнение временных характеристик динамических звеньев и объекта управления на интервале 50 тактов времени. В табл. 4 приводятся значения суммарной ошибки рассогласования E_1, E_2, E_3 для каждого динамического звена. Минимальная ошибка рассогласования была E_3 – система идентифицировала объект как апериодическое звено 2-го порядка.

Выбор структуры и расчет параметров регулятора. Для апериодического звена 2-го порядка был спроектирован ПИД-регулятор со следующими параметрами: $K_n = 0.18$; $K_u = 0.0093$; $K_d = 0.88$. Для подтверждения точности расчета параметров регулятора нейронной сетью аналогичный расчет был сделан с помощью функции PIDTUNE пакета прикладных программ MATLAB и имел следующий результат: $K_n = 0.17$; $K_u = 0.0088$; $K_d = 0.8$. Отклонение параметров, рассчитанных нейронной сетью, от расчетов с помощью функции PIDTUNE составляет менее десяти процентов.

Определение параметрического возмущения. В работе предложено использовать количественный метод оценки. Определение параметрического возмущения происходит по суммарной ошибке рассогласования между

сигналами реальной системы и эталонной модели за определенное количество тактов. В качестве параметрического возмущения было выбрано изменение постоянной времени T_1 . При определении параметрического возмущения заданное значение управляемой величины $r(t)$ изменялось ступенчато с 0 до 1. Интервал времени, на котором рассчитывалась суммарная ошибка рассогласования, был равен 300 тактам. В качестве граничного значения суммарной ошибки рассогласования было выбрано значение 50. Если величина ошибки рассогласования превышает значение 50 на интервале времени 300 тактов – в системе есть параметрическое возмущение, срабатывает сигнальный триггер, требуется повторная идентификация параметров объекта. Если величина ошибки рассогласования меньше 50 на интервале времени 300 тактов – система работает штатно.

Выбранная амплитуда и количество тактов для расчета суммарной ошибки рассогласования использовались в качестве примера. При произвольном изменении задания управляемой величины алгоритм идентификации должен быть дополнен функцией экстраполяции. Количество тактов для расчета суммарной ошибки рассогласования может быть связано с интервалом изменения заданного значения управляемой величины $r(t)$. В табл. 5 приводится зависимость суммарной ошибки рассогласования от изменения постоянной времени T_1 . На рис. 6 приводятся результаты моделирования замкнутой системы при разных значениях T_1 .

Таблица 5

Зависимость суммарной ошибки рассогласования от изменения постоянной времени T_1

T_1 (эталонная модель)	44		
T_1 (объект управления)	42	85	150
Ошибка рассогласования d	2.2	26.4	61.1

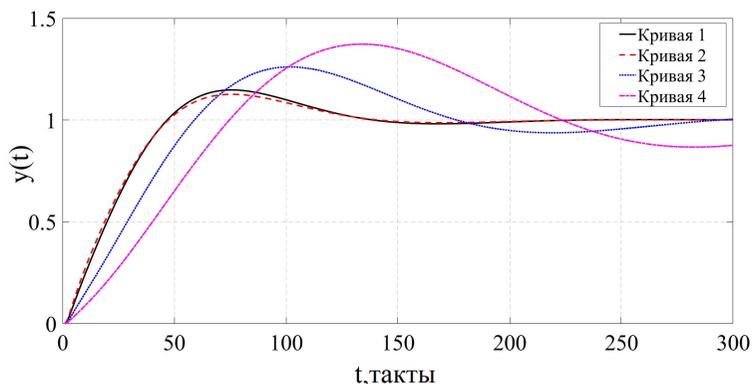


Рис. 6. Результат моделирования, изменение значения постоянной времени T_1 : кривая 1 – выходной сигнал эталонной замкнутой системы с настроенным нейронной сетью ПИД-регулятором ($T_1 = 44$); кривая 2 – выходной сигнал замкнутой системы ($T_1 = 42$); кривая 3 – выходной сигнал замкнутой системы ($T_1 = 85$); кривая 4 – выходной сигнал замкнутой системы ($T_1 = 150$)

Заключение

Работа посвящена интеллектуальной системе адаптации типовых законов автоматического регулирования с функцией идентификации структуры и параметров объекта. Функционал разработанной системы позволяет решить комплекс взаимосвязанных задач: идентификация структуры и параметров объекта, проектирование типового регулятора, определение критического изменения параметров системы. Были разработаны и описаны структурные схемы интеллектуальной системы и подсистемы идентификации. Алгоритмы идентификации объекта и проектирования регулятора были реализованы на базе нейросетевых технологий. При тестировании алгоритмы показали приемлемую точность идентификации параметров объекта и расчета коэффициентов типового регулятора. Применение нейронных сетей в качестве инструмента реализации позволило унифицировать и ускорить процесс создания системы. Все этапы создания системы легко масштабировать, адаптировать и автоматизировать. Была разработана программа, которая автоматически формирует данные обучающей выборки для нейронных сетей как для системы идентификации, так и для алгоритма проектирования регулятора. В программе разработчик может выбрать нужные структуры моделей и задать диапазон изменения их параметров, автоматически сформировать выборку, обучить нейронные сети и реализовать систему управления для конкретной установки или установок одного типа. Время реализации такой системы управления в пакете прикладных программ MATLAB составляет 15–20 минут.

Таким образом, предлагаемые в работе решения пригодны для идентификации структуры и параметров объектов, которые могут быть описаны типовыми динамическими звеньями и их соединением, проектирования систем управления для этих объектов и диагностики изменения параметров объекта в процессе эксплуатации. Для внедрения в существующие системы управления технологическим процессом разработанная система может быть выполнена в виде программного кода и интегрирована в SCADA-систему.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глуценко А.И. Нейросетевая адаптивная настройка регуляторов для управления нестационарными технологическими объектами в металлургии: дисс. докт. техн. наук: 05.13.06 // Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет МИСИС». Старый Оскол, 2020. 304 с.
2. Михалевич С.С. Частотный метод параметрического синтеза ПИД-регулятора для стационарных, интервальных и многосвязных САУ: дисс. канд. техн. наук: 05.13.06 // Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». Томск, 2015. 149 с.
3. Денисенко В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации // Современные технологии автоматизации. 2007. Ч. 1. № 4. С. 86–97.
4. Парфёнов С.В., Парфёнов В.И. Об одном решении задачи синтеза автоматических регуляторов в адаптивной системе управления отоплением // Вестник ЮУрГУ. 2012. № 23. С. 142–149.
5. Штейнберг Ш.Е., Серезин Л.П., Залуцкий И.Е., Варламов И.Г. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования // Промышленные АСУ и контроллеры. 2004. № 7. С. 1–7.
6. Омату С., Халид М., Юсуф Р. Нейроуправление и его приложения. Кн. 2 / Пер. Н.В. Батина. Под ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. ИПРЖР. 2000. 272 с.

7. *Бураков М.В.* Нейронные сети и нейроконтроллеры: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2013. 284 с.
8. *Елисеев В.Л.* Нейросетевой аналог ПИД-регулятора при управлении нелинейным объектом // Труды XVI всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях». Рязань, 2011. С. 199–201.
9. *Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глуценко А.И.* О применении нейросетевого оптимизатора параметров ПИ-регулятора для управления нагревательными печами в различных режимах работы // Управление большими системами: сборник трудов. 2015. № 56. С. 143–175.
10. *Еременко Ю.И., Глуценко А.И., Фомин А.В.* Об оценке эффективности применения нейросетевого настройщика ПИ-регулятора, реализованного средствами Siemens Simatic S7 300/400, при управлении муфельной электронагревательной печью // Промышленные АСУ и контроллеры. 2017. № 9. С. 47–54.
11. *Белов М.П., Носиров И.С., Белов А.М.* Синтез нейросетевого регулятора двухмассовой электромеханической системы привода подачи токарного станка // СПБГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 8. С. 70–76.
12. *Soloway D., Haley P.J.* Neural Generalized Predictive Control // Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control. 18 September 1996. 15. P. 277–281.
13. *Кузнецов А.В., Макарьянц Г.М.* Разработка нейросетевого модели малоразмерного газотурбинного двигателя // Вестн. Самар. госуд. аэрокосм. ун-та им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 2. С. 131–144.
14. *Лысенко Д.С., Данилушкин И.А.* Динамическая модель котла-утилизатора на базе рекуррентной нейронной сети // Вестн. Самар. госуд. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. 2020. Вып. 2 (65). С. 59–72.
15. *Александров И.С., Григорьев Б.А., Герасимов А.А.* Прогнозирование фазового поведения технологических фракций нефти на основе PC-SAFT уравнения состояния с использованием искусственных нейронных сетей // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2018. № 5 (37). С. 4–11.
16. *Трыков Е.Л., Трыкова И.В., Коцов Е.И.* Обнаружение аномалий в работе реакторного оборудования с помощью нейросетевых алгоритмов // Моделирование процессов в объекте ядерной энергетики. 2020. № 3. С. 136–147.
17. *Абрамов Н.С., Талалаев А.А., Фраленко В.П.* Интеллектуальный анализ телеметрической информации для диагностики оборудования космического аппарата // Информационные технологии и вычислительные системы. 2016. № 1. С. 64–75.
18. *Лохин В.М., Романов М.П.* Интеллектуальные системы управления – перспективная платформа для создания техники нового поколения // Вестн. Москов. госуд. техн. ун-та МИРЭА. 2015. № 1(2). С. 1–24.
19. *Романов М.П.* Високоточная система управления для сборочных роботов на основе ассоциативной памяти // Вестн. Москов. госуд. техн. ун-та МИРЭА. Сер. Роботизированные комплексы и системы технологии. 2015. Вып. 3 (8). С. 60–87.
20. *Романов М.П., Киор С.В.* Нейросетевая система управления прецизионного мехатронного модуля геостационарного космического аппарата // Вестн. Москов. госуд. техн. ун-та МИРЭА. Сер. Роботизированные комплексы и системы технологии. 2015. Вып. 3 (8). С. 88–107.
21. *Барабанов А.Е.* Применение метода наименьших квадратов для построения адаптивного оптимального управления линейным динамическим объектом // Автомат. и телемех. 1983. Вып. 12. С. 57–65.
22. *Невельсон М.Б., Хасьминский Р.З.* Стохастическая аппроксимация и рекуррентное оценивание. М.: Наука, 1972. 304 с.
23. *Семенов А.Д., Артамонов Д.В., Брюхачев А.В.* Идентификация объектов управления: учеб. пособие. Пенза: ПГУ, 2003. 211 с.
24. *Aleksandrov A.G.* Frequency Regulators // Autom. Remote Control. 1991. V. 52. No. 1. Part 1. P. 17–26.
25. *Пьявченко Т.А.* Метод идентификации промышленного объекта по его временной и частотной характеристикам // Известия ЮФУ. Техн. науки. 2010. № 7. С. 216–219.
26. *Клюев А.С., Лебедев А.Т., Новиков С.И.* Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов. М.: Энергоатом издат, 1985. 279 с.
27. *Андрюшин А.В., Сабанин В.Р., Смирнов Н.И.* Управление и инноватика в теплоэнергетике. М: МЭИ, 2011. 392 с.

28. Царегородцев Е.Л., Сибильникова Н.П., Гольцев И., Ю. К вопросу моделирования и анализа системы управления водонагревателя, работающего на газе // Инновации и инвестиции. 2020. № 4. С. 190–194.
29. Кулаков Г.Т., Горельшева М.Л. Исследование влияния качества регулирования температуры перегретого пара на срок службы металла пароперегревателя котлов // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2009. № 4. С. 62–69.
30. Теплогидравлические модели оборудования электрических станций / Под общ. ред. Г.А. Филиппова, Ф.Ф. Пашенко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 448 с.
31. Стрижнёв А.Г., Марков А.В., Русакович А.Н. Идентификация объекта управления по переходной характеристике замкнутой системы // Доклады БГУИР. 2012. № 5 (67). С. 65–72.
32. Пикина Г.А., Пащенко Ф.Ф. Идентификация переходных характеристик объектов в человеко-машинных системах // Моделирование систем. 2013. № 3 (37). С. 53–59.
33. Волков В.В. Моделирование и экспериментальная отработка системы терморегулирования калибровочного источника излучения на базе ПИД-регулятора // Вестн. Самар. ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16. № 4. С. 101–107. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-4-101-107
34. Рапопорт Э.Я., Рыбаков В.К. Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока. Самара: СамГТУ, 2003.
35. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием: Пер. с польского. М.: Машиностроение, 1974. 328 с.

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2021 г.

INTELLIGENT SYSTEM OF ADAPTATION TYPICAL LAWS AUTOMATIC REGULATION WITH THE FUNCTION OF IDENTIFICATION STRUCTURE AND PARAMETERS OBJECT

D.S. Lysenko *

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: dmitry-lusenko@yandex.ru

Abstract. *The structure of an intelligent system for adapting typical automatic control laws with the function of identifying the structure and parameters of an object has been developed and described. The developed system solves a complex of interrelated tasks: identification of the structure and parameters of an object, calculation and selection of the controller type, determination of parametric disturbances in a closed control loop. The intelligent system consists of three circuits: the identification circuit, the ACS design circuit, and the executive circuit. The tasks of the identification circuit include: identification of the structure and parameters of the object by observing the time characteristic of the object with a step action at the input; determination of the presence of a parametric disturbance by the method of comparative assessment of transient processes of the reference model and the real control object. According to the results of identifying the structure and parameters of the object, the controller is designed - the calculation of parameters and the choice of the type of controller. The executive circuit is represented by a closed control system. Neural networks were chosen as a tool for implementing the identification subsystem and the regulator design subsystem. As a prototype of the control object, typical dynamic links and their connections were chosen. The article contains: description of the structure of the intelligent system of adaptation of typical automatic control laws; description of subsystems for identifying and designing the regulator; structural and graphical diagrams, simulation results.*

Keywords: *intelligent control system, control theory, design of standard controllers, calculation of PID controller parameters, identification structure and parameters of an object, neural networks.*

REFERENCES

1. *Glushchenko A.I.* Neural network adaptive adjustment of regulators for controlling non-stationary technological objects in metallurgy: thesis of Doctor of Technical Sciences: 05.13.06 // Starooskolsky Technological Institute. A.A. Ugarov (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Technological University MISIS". Stary Oskol. 2020. 304 pp.
2. *Mikhailevich S.S.* Frequency method of parametric synthesis of PID-controller for stationary, interval and multi-connected automatic control systems: Ph.D. thesis: 05.13.06 // Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Tomsk Polytechnic University". Tomsk. 2015. 149 pp.
3. *Denisenko V.* PID controllers: implementation issues. Part 1 // Modern automation technologies. 2007. No. 4. P. 86–97.
4. *Parfyonov S.V., Parfyonov V.I.* On one solution to the problem of synthesis of automatic controllers in an adaptive heating control system. YUrGU Bulletin. 2012. No. 23. P. 142–149.
5. *Serezhin L.P., Zalutsky I.E., Varlamov I.G.* Problems of creation and operation of effective control systems // Industrial ASU and controllers. 2004. No. 7. P. 1–7.
6. *Omatu S., Khalid M., Yusuf R.* Neurocontrol and its application. IPRJR. 2000. 272 p.
7. *Burakov M.V.* Neural networks and neurocontrollers: textbook. allowance. SPb.: GUAP, 2013.

* *Dmitrij S. Lysenko, Postgraduate Student.*

- 284 p.
8. Neural network analogue of the PID controller when controlling a nonlinear object. Proceedings of the XVI All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Young Scientists and Specialists "New Information Technologies in Scientific Research", Ryazan, 2011. P. 199–201.
 9. *Eremenko Yu.I., Poleshchenko D.A., Glushchenko A.I.* About application neural network optimizer of PI-controller parameters for controlling heating furnaces in different operating modes // Control of big systems: collection of works. 2015. No. 56. P. 143–175.
 10. *Eremenko Yu.I., Glushchenko A.I., Fomin A.V.* About the assessment the efficiency of using the neural network adjuster of the PI controller, implemented by means of Siemens Simatic S7 300/400, when controlling muffle electric heating furnace // Industrial ASU and controllers. P. 47–54.
 11. *Belov M.P., Nosirov I.S., Belov A.M.* Synthesis of a neural network controller for a two-mass electromechanical feed drive system for a lathe SPBGETU "LETI". 2018. No. 8. P. 70–76.
 12. *Soloway D., Haley P.J.* Neural Generalized Predictive Control // Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control. 1996. 15. P. 277–281.
 13. *Kuznetsov A.V., Makaryants G.M.* Development of a neural network model of a small-sized gas turbine engine // Bulletin of the Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyova (National Research University). 2016. Vol. 15, No. 2. P. 131–144.
 14. *Lysenko D.S., Danilushkin I.A.* Dynamic model of a waste-heat boiler based on a recurrent neural network // Bulletin of the Samara State Technical University. Ser. Technical science. 2020. 2 (65). P. 59–72.
 15. *Aleksandrov I.S., Grigoriev B.A., Gerasimov A.A.* Prediction of the phase behavior of technological oil fractions based on the PC-SAFT equation of state using artificial neural networks // Scientific and technical collection of news of gas science. 2018. 5(37). P. 4–11.
 16. *Trykov E.L., Trykova I.V., Kotsaev K.I.* Detection of anomalies in the operation of reactor equipment using neural network algorithms // Modeling of processes in a nuclear power facility. 2020. 3. P. 136–147.
 17. *Abramov N.S., Talalaev A.A., Fralenko V.P.* Intelligent analysis of telemetric information for diagnostics of spacecraft equipment // Information technologies and computing systems. 2016. 1. P. 64–75.
 18. *Lokhin V.M., Romanov M.P.* Intelligent control systems – a promising platform for creating a new generation of technology // Bulletin of the Moscow State Technical University MIREA. 2015. 1(2). P. 1–24.
 19. *Romanov M.P.* High-precision control system for assembly robots based on associative memory // Bulletin of the Moscow State Technical University MIREA "HERALD of MSTU MIREA". Ser. Robotic complexes and technology systems. 2015. 3(8). P. 60–87.
 20. *Romanov M.P., Kior S.V.* Neural network control system of a precision mechatronic module of a geostationary spacecraft // Bulletin of the Moscow State Technical University MIREA "HERALD of MSTU MIREA". Ser. Robotic complexes and technology systems. 2015. 3(8). P. 88–107.
 21. *Barabanov A.E.* Application of the least squares method for constructing an adaptive optimal control for a linear dynamic object. Avtomat. and telemekh. 1983. 12. P. 57–65.
 22. *Nevel'son M.B., Khas'minsky R.Z.* Stochastic approximation and recurrent estimation. M.: Nauka, 1972. 304 p.
 23. *Semenov A.D., Artamonov D.V., Bryukhachev A.V.* Identification objects of management: Uchebn. allowance. Penza: PSU, 2003. 211 pp.
 24. *Aleksandrov A.G.* Frequency Regulators // Autom. Remote Control. 1991. V. 52. No. 1. Part 1. P. 17–26.
 25. *Piavchenko T.A.* Method for identifying an industrial facility by its time and frequency characteristics // Izvestia SFU. Technical science. 2010. No. 7. P. 216–219.
 26. *Klyuev A.S., Lebedev A.T., Novikov S.I.* Adjustment of automatic control systems for drum steam boilers. M.: Energoatomizdat, 1985. 279 p.
 27. *Andryushin A.V., Sabanin V.R., Smirnov N.I.* Management and innovation in heat power engineering. M.: MEI, 2011. 392 p.
 28. *Tsaregorodtsev E.L., Sibilnikova N.P., Goltsev I.Y.* On the issue of modeling and analysis of the control system of a gas-fired water heater // Innovations and investments. 2020. No. 4. P. 190–194.
 29. *Kulakov G.T., Gorelysheva M.L.* Study of the influence of the quality of superheated steam temperature control on the service life of the metal of the boiler superheater // News of higher

- educational institutions and energy associations of the CIS – Energy: a scientific, technical and industrial journal. 2009. No. 4. P. 62–69.
30. Thermal-hydraulic models of power station equipment. Ed. by G.A. Filipova, F.F. Pashchenko. M.: FIZMATLIT, 2013. 448 pp.
 31. *Strizhnev A.G., Markov A.V., Rusakovich A.N.* Identification of the control object by the transient characteristic of a closed system // Reports of BSUIR. 2012. No. 5(67). P. 65–72.
 32. *Pikina G.A., Pashchenko F.F.* Identification of transient characteristics of objects in human-machine systems // Modeling of systems. 2013. No. 3(37). P. 53–59.
 33. *Volkov V.V.* Modeling and experimental testing of the thermal control system of a calibration radiation source based on a PID controller // Bulletin of the Samara University. Aerospace engineering, technologies and mechanical engineering. 2017. V. 16, No. 4. P. 101–107.
 34. *Rapoport E.Y., Rybakov V.K.* Systems of subordinate regulation of DC electric drives. Samara: SSTU. 2003.
 35. *Guretsky H.* Analysis and synthesis of control systems with delay. M.: Mechanical Engineering, 1974. 328 p.

УДК 004.032.26

ГЛУБОКАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО РЕЛЬСОВОГО ПУТИ

*С.П. Орлов, Н.А. Ефимушкин, Н.В. Ефимушкина**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: orlovsp1946@gmail.com, efimushkin1999@mail.ru, nvefimushkina@mail.ru

Аннотация. Задачи повышения скорости железнодорожных перевозок и обеспечения их надежности связана с постоянным мониторингом состояния рельсовых путей. Современные вагоны-путеизмерители оснащены видеоаппаратурой и компьютерной техникой для обработки получаемой информации. Однако ручная обработка данных операторами в реальном времени невозможна в связи с большим объемом информации. Предложена глубокая конволюционная нейронная сеть для автоматического распознавания и классификации дефектов рельсовых стыков на изображениях рельсового пути. Массив изображений формируется в процессе видеосъемки рельсов при проходе вагона-путеизмерителя по участку железной дороги. Описано формирование классов рельсовых стыков. Рассматриваются обычные рельсовые стыки с соединителем, изолирующие стыки и сварные стыки. Выделены дополнительные классы, соответствующие различным аномальным конфигурациям рельсовых стыков на изображениях. Построена модифицированная структура предварительно обученной глубокой конволюционной сети. При подготовке обучающих выборок выполнено дополнение реальных изображений рельсовых стыков искусственными изображениями, полученными аффинными преобразованиями. Описан процесс обучения и тестирования классификатора на базе разработанной конволюционной сети. Для обучения нейронной сети используется метод переноса обучения. В результате экспериментов получена точность классификации рельсовых стыков и выявления дефектов не менее 96 %.

Ключевые слова: техническая диагностика, киберфизические системы, искусственная нейронная сеть, машинное обучение, рельсовый путь, стыки между рельсами.

Введение

Современные скоростные железные дороги представляют собой киберфизические системы, состоящие из взаимодействующих подсистем: рельсового пути, подвижного состава, системы энергетики, информационно-измерительных и управляющих систем [1, 2].

* Орлов Сергей Павлович, профессор кафедры «Вычислительная техника», доктор технических наук.

Ефимушкин Николай Андреевич, магистрант кафедры «Вычислительная техника».

Ефимушкина Наталья Владимировна, доцент кафедры «Вычислительная техника», кандидат технических наук.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-08-00797.

Ключевыми критериями работы железных дорог являются надежность и рентабельность [3]. При этом наибольшие проблемы возникают в области интенсивного энергетического взаимодействия колесных пар транспортных средств и рельсового пути.

Рельсовый стык является местом соединения двух примыкающих концов рельсов при наличии специального скрепления. Рельсовый стык должен обеспечивать переход колеса с минимальной ударной нагрузкой. Представляя самую слабую часть пути, рельсовый стык постоянно изучается и совершенствуется. В процессе эксплуатации в нем могут возникать дефекты, приводящие к нежелательным, а порой и к катастрофическим последствиям [4].

Наиболее эффективными методами определения технических состояний элементов рельсового пути являются вибродиагностика и статистическая обработка сигналов [5–7], а также визуальное наблюдение [8, 9].

Кроме того, рельсовый стык участвует в образовании и функционировании рельсовой электрической цепи. Главное назначение рельсовой цепи – обнаружение присутствия поезда или подвижного состава на участке пути, образующем рельсовую цепь. Рельсовые цепи являются основным элементом автоматической блокировки и применяются для различных целей в устройствах диспетчерской централизации, при ограждении переездов, а также на механизированных сортировочных станциях [10].

Существует проблема оперативной обработки и анализа данных мониторинга рельсового пути. Визуальный контроль предполагает съемку на высокой скорости сотен километров рельсов за один проезд вагона-путьеизмерителя. В результате получают десятки тысяч изображений, которые операторы не могут обработать в реальном времени. Решение задачи предлагается выполнить с использованием интеллектуальных методов обработки больших массивов информации [11–13]. В связи с этим контроль и диагностика состояния рельсовых стыков с помощью искусственных нейронных сетей является актуальной задачей.

Классификация технических состояний рельсовых стыков

В работе [13] описан диагностический комплекс в составе вагона-путьеизмерителя. В состав комплекса входят четыре видеокamеры для непрерывной регистрации визуального изображения обоих рельсов, блок препроцессинга изображений и подсистема принятия решений о состоянии рельсового пути (рис. 1). Диагностический комплекс использовался для контроля только рельсовых скреплений. В настоящей статье рассматривается построение глубокой нейронной сети для выявления дефектов рельсовых стыков.

Формирование изображений рельсовых стыков происходит следующим образом. Поезд с вагоном-путьеизмерителем движется равномерно со скоростью 30 м/с (108 км/ч). Съемка производится с частотой 60 снимков в секунду с градациями серого (Grayscale). Все сделанные снимки имеют размеры 1024×500 пикселей и склеиваются в единое полотно для каждой камеры. При получении нового кадра осуществляется его склеивание с концом полотна практически без «перехлеста». В итоге образуется файл с данными как единое изображение размером $1024k \times 500$, где k – число кадров в файле полотна. Файл содержит в названии номера вагона, камеры и проезда, дату и время съемки.

Затем из данных в файле полотна вырезаются кадры 300×300 со стыками. Для этого используются существующие алгоритмы, обеспечивающие детекцию стыка в кадре; центрирование стыка и масштабирование.

На российских железных дорогах используются три основных типа рельсовых стыков [14]: обычный стык; изолирующий стык; сварной стык.

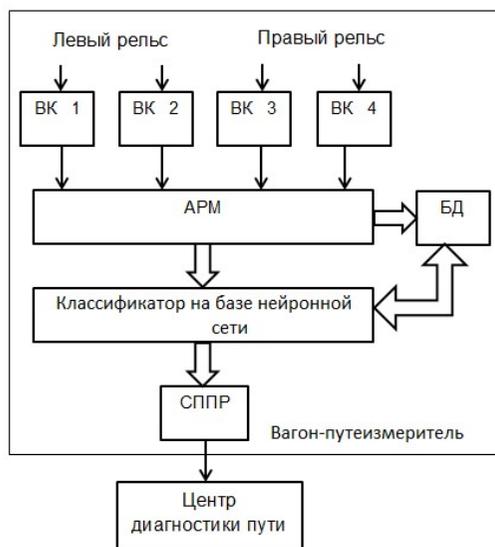


Рис. 1. Система мониторинга рельсового пути:
 ВК 1 – ВК 4 – видеокамеры видимого спектра;
 АРМ – автоматизированное рабочее место оператора;
 БД – база данных видеосъемки;
 СППР – система поддержки принятия решений

Первый тип соответствует соединению рельсов при помощи накладки и болтов. Зазор в таком стыке может быть нулевым. Накладка обычно крепится при помощи четырех или шести болтов.

Различают два варианта обычного стыка: без соединителя и с соединителем. Соединитель в виде жгута проводов служит для образования надежной эклектической цепи. На рис. 2, а и рис. 2, б показаны примеры обычных рельсовых стыков. Изображение изолирующего стыка приведено на рис. 2, в, а изображение сварного стыка – на рис. 2, г.

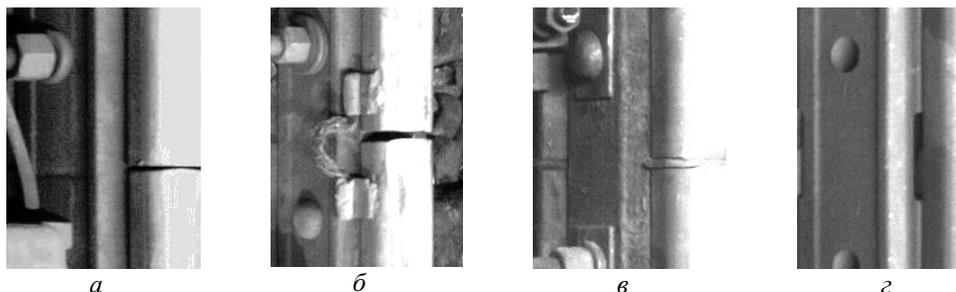


Рис. 2. Типы рельсовых стыков: а – обычный стык без соединителя; б – обычный стык с соединителем; в – изолирующий стык; г – сварной стык

В данной работе рассматриваются два основных типа дефектов, которые могут возникать в обычном стыке с соединителем: соединитель оторван с одного конца; соединитель оторван полностью.

Примеры этих дефектов приведены на рис. 3, *а* и рис. 3, *б* соответственно. На рис. 3, *а* один из концов соединителя не закреплен и висит в воздухе, а на рельсе видны следы от него. На рис. 3, *б* полностью отсутствуют любые элементы соединителя. При этом хотя бы на одном рельсе должны присутствовать следы оторванного конца соединителя. Стоит отметить, что наличие таких следов на изолирующем или сварном стыке не является дефектом, так в этих стыках соединители не используются.

Для полного описания возможных классов изображений рельсовых стыков предлагается добавить два дополнительных типа изображений: «Рельс без стыка» и «Отсутствующий рельс». Примеры таких ситуаций показаны на рис. 4. В первом случае был заснят участок дороги, где на рельсе нет стыка. Такие кадры могут быть иметь место, так как видеосъемка ведется непрерывно, а расстояния между стыками рельсов могут отличаться. Второй вариант связан с вероятностью попадания в кадр участка рельсового пути с поворотом. В этом случае на рельсах может не быть стыка либо в кадр могут попасть сразу несколько рельсов (рис. 4, *а*).

Отсутствовать рельс может в случае сбоя, произошедших в камере. Она может быть изначально неправильно настроена либо сбита во время движения вагона-путеизмерителя. Часто в такие кадры попадают накладки, шпалы, крепления, камни и другие посторонние предметы (рис. 4, *б*).

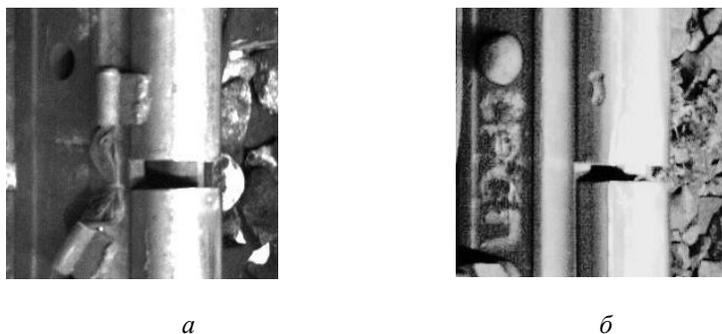


Рис. 3. Дефектные стыки: *а* – обычный стык с соединителем, оторванным с одного конца; *б* – обычный стык с полностью оторванным соединителем



Рис. 4. Дополнительные классы изображений: *а* – участок рельса без стыка; *б* – изображение без рельса

Для идентификации типа и технического состояния рельсового стыка предложены восемь классов. Каждый из таких классов описывает определенные характеристики места соединения рельсов. Названия классов изображений и их соответствие типам и состояниям стыков приведены в табл. 1.

Таблица 1

Классы изображений и типы состояний рельсовых стыков

Обозначение класса	Тип и состояние рельсового стыка	Количество исходных изображений в классе
conn	Обычный стык с соединителем	7010
cut	Обычный стык с соединителем. Соединитель оторван с одного конца	1446
fake	Изображение, на котором нет рельса	7004
fake_rail	Изображение, на котором нет стыка	1010
iso	Изолирующий стык	5024
missing	Обычный стык с соединителем. Соединитель полностью оторван	5024
no_conn	Обычный стык без соединителя	5010
weld	Сварной стык	5008

Классы fake_rail (рельс без стыка) и fake (отсутствующий рельс) образуют дополнительные изображения, которые могут быть получены при съемке. Они описаны ранее и представлены соответственно на рис. 4.

Структура конволюционной нейронной сети VGG16 для классификации состояний рельсовых стыков

В качестве входных данных системы классификации рельсовых стыков используются изображения размером 300×300 пикселей в оттенках серого. Затем изображение уменьшается в 2 раза для получения кадра с размерностью $150 \times 150 \times 1$. Каждый элемент массива пикселей в кадре делится на 255, что позволяет свести значения яркости пикселей к диапазону от 0 до 1.

Разработка нейронной сети проводилась с использованием библиотек Tensorflow и Keras [15].

Для решения задачи классификации состояний рельсовых стыков была спроектирована предварительно обученная конволюционная сеть VGG16 [16]. Сеть была обучена на массиве изображений с сайта ImageNet: животных и растений, домов, автомобилей и других объектов.

На рис. 5 представлена архитектура нейронной сети, используемой для классификации рельсовых стыков. Модель сети содержит слои InputLayer (входной слой), Conv2D (конволюционный (сверточный) слой), MaxPooling2D (слой максимального объединения), BatchNormalization (нормализация, защита от переобучения), Flatten (спрямляющий), Dense (полносвязный), а также Activation (активационный). Стрелками указан порядок следования слоев. Каждый блок на рисунке содержит информацию о названии и типе слоя. Правое верхнее поле блока содержит размерности входных массивов, правое нижнее поле – размерности выходных массивов.

Исходная модель VGG16 обучена на изображениях размером $224 \times 224 \times 3$. Для классификации стыков необходимо обучить модель на имеющихся изображениях размером $150 \times 150 \times 1$. В исходной модели можно поменять размеры кад-

ров, если загрузить ее без полносвязных слоев, то есть использовать только feature extractor самой модели.

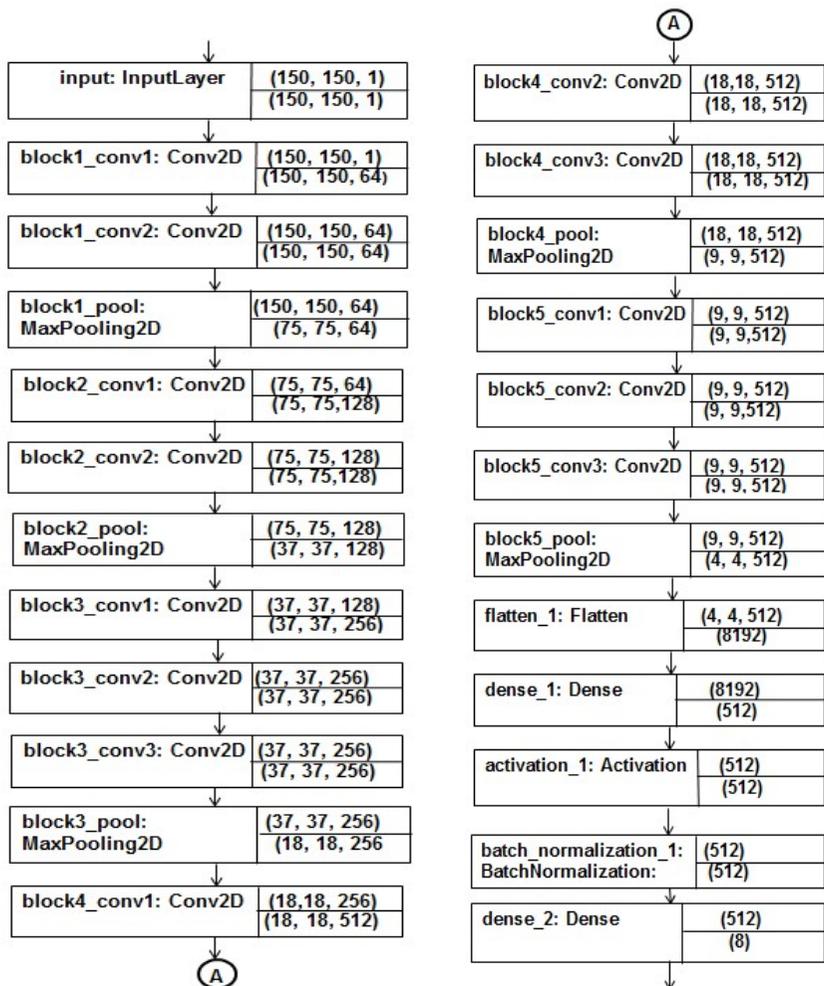


Рис. 5. Структура классификатора рельсовых стыков на базе нейронной сети VGG16

Загрузка самого feature extractor модели производится не с целью его обучения, а с целью получения весов с его слоев. Так как модель VGG16 использует RGB-вход, а обучение будет проводиться на grayscale-кадрах, то копия архитектуры feature extractor для VGG16 переопределяется путем задания в качестве входного слоя с размерами $150 \times 150 \times 1$ (слой 0). Далее в эту сформированную структуру загружаются веса оригинальной сети VGG16 для слоев, начиная со второго. Для слоя 1 выполняется усреднение по всем трем каналам (RGB) исходных весов VGG16, и результат добавляется в новую версию модели. После этого добавляется классификатор собственной разработки.

Таким образом, классификатор в исходной сети VGG16 полностью заменен классификатором собственной разработки (последние четыре блока на рис. 5). Это связано с используемым способом обучения, который описан далее. Классификатор содержит два полносвязных слоя, активационный и слой нормализации.

Исходные веса в предобученной VGG16 в этом участке конволюционной сети не сохраняются, так как классификатор собственной разработки подготовлен для новой решаемой задачи и его веса необходимо получить, проводя обучение заново.

Каждое изображение с некоторой вероятностью принадлежит к определенному классу. Выходной слой нейронной сети содержит 8 нейронов, при этом каждый из нейронов соответствует определенному классу в табл. 1. Выходной сигнал нейрона равен вероятности принадлежности изображения к заданному классу после прохождения через нейронную сеть.

В рамках разработки глубокой нейронной сети была использована одна из разновидностей градиентного спуска – Adam (Adaptive Moment Estimation) [17]. Метод, в частности, вычисляет экспоненциальное скользящее среднее градиента и квадратичный градиент.

Формирование обучающих выборок и обучение нейронной сети

Для тренировки разработанной нейронной сети используется режим обучения с учителем. Для этого 90 % изображений помещаются в обучающий набор и 10 % изображений – в тестовый набор. В связи с тем, что имеется небольшое количество исходных изображений (менее 10 000 для наиболее часто встречающегося класса), необходима генерация дополнительных изображений. Это в первую очередь касается классов *fake rail* и *cut*.

Новые кадры создаются следующими аффинными преобразованиями: вертикальный поворот исходного кадра (поворот на 180 градусов); уменьшение и увеличение яркости кадра (максимум на 70 %); поворот на 2 градуса в случайном направлении относительно центра кадра; приближение изображения (максимум на 10 %). Эти изображения генерируются только для обучающей выборки.

Табл. 2 содержит данные о количестве изображений в каждом классе после аугментации данных.

Таблица 2

Объем обучающей выборки после дополнения кадров

Классы							
conn	no_conn	iso	weld	cut	missing	fake	fake rail
378553	78121	378254	54542	271327	271326	270552	270487

Общий объем выборки для обучения нейронной сети составил 1 973 162 кадра.

Оценка потерь выполняется категориальной перекрестной энтропией. Для повышения скорости обучения выбрано значение 10-5. В процессе обучения отслеживается изменение точности классификации и потерь относительно номера шага. Максимальный период обучения нейронной сети ограничивался значением 100 эпох. Если в течение пяти шагов на каждой эпохе точность классификации модели улучшилась менее чем на 0.001, то тренировка сети останавливается. Это помогает предотвратить переобучение.

Для обучения нейронной сети использовался метод переноса обучения [18]. Он предполагает использование исходного сверточного участка предобученной сети и собственного классификатора. Веса сверточного участка берутся из VGG16 и «замораживаются» (остаются неизменными в процессе обучения). То-

гда процесс обучения не влияет на сверточный участок сети. Напротив, для классификатора происходит настройка весов в ходе тренировки сети.

Точность классификатора после обучения оценивается с использованием двух метрик Precision и Recall. Метрика Precision или PPV показывает долю рельсовых стыков, отнесенных классификатором к заданному классу и при этом действительно принадлежащих этому классу:

$$PPV_K = \frac{TP}{TP_K + FP_K},$$

где $K = \overline{1,8}$ – количество классов рельсовых стыков; TP_K – истинно-положительные предсказания; FP_K – ложноположительные, то есть тестовые результаты, ошибочно классифицирующие стык как принадлежащий классу K .

Метрика Recall или TPR демонстрирует способность классификатора обнаруживать данный класс рельсовых стыков вообще во множестве всех анализируемых изображений:

$$TPR_K = \frac{TP_K}{TP_K + FN_K},$$

где FN_K – ложноотрицательные результаты, то есть тесты, которые ошибочно классифицируют стыки как не принадлежащие классу K .

Иногда имеет смысл оценить обе метрики с помощью агрегированного критерия качества в виде F1-меры, которая представляет собой среднее гармоническое значение двух величин.

Полученные результаты тренировки нейронной сети для каждого из классов рельсовых стыков показаны в табл. 3. В табл. 4. приведены средние значения метрик разработанного классификатора рельсовых стыков на глубокой нейронной сети.

Таблица 3

Метрики классификации рельсовых стыков

Метрики	Классы							
	conn	no_conn	iso	weld	cut	missing	fake	fake_rail
PPV	0.96	0.98	0.91	0.98	0.97	0.95	1.00	0.99
TPR	0.98	0.90	1.00	1.00	0.93	0.95	0.98	0.95
F1 score	0.97	0.94	0.95	0.99	0.95	0.95	0.99	0.97

Таблица 4

Общая статистика нейросетевого классификатора

Метрики			
Accuracy	Loss	Precision	Recall
0.963	0.199	0.964	0.962

Таким образом, разработанная нейронная сеть может эффективно выполнять классификацию состояний рельсовых стыков в целом с точностью 96 %.

Заключение

В работе представлена глубокая нейронная сеть VGG16, предназначенная для классификации рельсовых стыков и выявления их дефектов. Нейронная сеть

работает в составе диагностического комплекса рельсового пути, обеспечивающего получение изображений рельсов при движении вагона-путеизмерителя.

Предложена модифицированная архитектура предобученной глубокой сети, что позволило повысить скорость и точность классификации рельсовых стыков. Разработана методика обучения и тестирования нейронной сети. Экспериментальные исследования сети при прохождении вагона-путеизмерителя на участке железной дороги показали достижение точности классификации стыков не менее 96 %.

Дальнейшее развитие интеллектуальной диагностической системы предполагается выполнять в направлении совершенствования архитектуры глубокой конволюционной сети. В частности, перспективным является использование архитектуры RetinaNet с базовой частью (backbone), построенной на нейронной сети типа ResNet или EfficientNet [19, 20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Zhang L.* Specification of Railway Cyber-Physical Systems Using AADL // *Advanced Technologies, Embedded and Multimedia for Human-centric Computing. Lecture Notes in Electrical Engineering.* Springer. 2013. Vol. 260. P. 377.
2. *Lee E.A., Seshia S.A.* Introduction to embedded systems, A Cyber-Physical Systems approach. 2nd edn. The MIT Press, USA. 2017.
3. Концепция развития систем диагностики и мониторинга объектов путевого хозяйства на период до 2025 года. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/420365526?marker=6540IN> (дата обращения 29.07.2019).
4. *Павленко В.В.* Система определения предотказного состояния бесстыкового пути для обеспечения безопасности движения поездов // *Транспорт Российской Федерации.* 2011. № 5(36). С. 31–33.
5. *Yi H., Kai L.* Inspection and monitoring technologies of transmission lines with remote sensing. Academic Press. 2017. P. 530.
6. *Wei J., Liu C., Ren T., Liu H., Zhou W.* Online condition monitoring of a rail fastening system on high-speed railways based on wavelet packet analysis // *Sensors.* 2017. Vol. 17(2). Pp. 318.
7. *Bombarda D., Vitetta G.M., Ferrante G.* Rail Diagnostics Based on Ultrasonic Guided Waves: An Overview // *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11(3), 1071.
8. *Feng H., Jiang Z., Xie F., Yang P., Shi J., Chen L.* Automatic fastener classification and defect detection in vision-based railway inspection systems // *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement.* 2014. Vol. 63(4). P. 877–888.
9. *Karakose M., Yaman O., Akin E., Baygin M., Murat K.* A new computer vision based method for rail track detection and fault diagnosis in railways // *Int. Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research.* 2017. Vol. 6(1). P. 22–27.
10. *Andronchev I.K., Tarasov E.M., Bulatov A.A. et al.* A Technique for Diagnosis of the Resistance of Conductive Rail Track Joints // *Russian Electrical Engineering.* 2020. Vol. 91. P. 149–152.
11. *Faghih-Roohi S., Hajizadeh S., Nunez A., Babuska R., De Schutter B.* Deep convolutional neural networks for detection of rail surface defects // *Proc. of the 2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN).* 2016. P. 2584–2589.
12. *Орлов С.П., Гурин Р.В., Пилецкая А.В.* Интеллектуальная система обработки информации при мониторинге рельсовых путей // *Сб. тр. III Международ. научн. конф. по проблемам управления в технических системах (CTS 2019).* С.-Петербург. 2019. С. 302–305.
13. *Орлов С.П., Пилецкая А.В., Кусакина Н.М., Тюгашев А.А.* Машинное обучение диагностической нейронной сети для мониторинга железнодорожного пути // *Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та.* 2020. Т. 3. С. 94–99.
14. Рельсовые стыки // *Lokomo. Железнодорожный путь.* 2020. Режим доступа: <https://lokomoto.ru/zheleznodorozhnyy-put/relsovye-styki.html> (дата обращения: 27.12.21).

15. Keras: The Python Deep Learning library. Режим доступа: <https://keras.io/applications/> (дата обращения: 10.01.2022).
16. *Simonyan K., Zisserman A.* Very deep convolution networks for large-scale image recognition//2014. arXiv:1409.1556
17. *Kingma D.P., Ba J.L.* Adam: a method for stochastic optimization // 2017. arXiv:1412.6980v9 [cs.LG].
18. *Gupta V., Murzova A.* Keras Tutorial: Transfer Learning using pre-trained models // Learn OpenCV. 2021. Режим доступа: <https://learnopencv.com/keras-tutorial-transfer-learning-using-pre-trained-models> (дата обращения: 20.12.21).
19. *Zeng N.* RetinaNet Explained and Demystified. 2018. Режим доступа: <https://blog.zenggyu.com/en/post/2018-12-05/retinanet-explained-and-demystified> (дата обращения: 25.12.21).
20. *Mingxing Tan, Quoc V. Le.* EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks//2019. arXiv:1905.11946v5 [cs.LG].

Статья поступила в редакцию 10 октября 2021 г.

DEEP NEURAL NETWORK FOR DIAGNOSTICS OF RAILWAY TRACK COMPONENTS

*S.P. Orlov, N.A. Efimushkin, N.V. Efimushkina**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: orlovsp1946@gmail.com, efimushkin1999@mail.ru, nvefimushkina@mail.ru

Abstract. *The problem of increasing the speed of railway transportation and ensuring reliability is associated with constant monitoring of the condition of the railway tracks. The modern track measuring cars are equipped with video cameras and computer equipment for processing the received information. However, manual processing of data by operators in real-time is not possible. The article proposes a deep convolutional neural network for automatically recognizing and classifying defects in rail joints on rail track images. The rail video observation forms the image array during the passage of the track recording car. The formation of classes of rail joints is described. Regular rail joints with connectors, insulating joints, and welded joints are considered. Additional classes are identified, corresponding to various anomalous configurations of rail joints in the images. A modified structure of a pre-trained deep convolutional network is constructed. When preparing training samples, the actual images of rail joints were supplemented with artificial images obtained by affine transformations. The process of training and testing the classifier based on the developed convolutional network is described. The Transfer Learning is used to train the neural network. As a result of the experiments, the accuracy of classifying rail joints and detecting defects was at least 96%.*

Keywords: *technical diagnostics, cyber-physical system, artificial neural network, machine learning, rail track, splice-joints.*

REFERENCES

1. *Zhang L.* Specification of Railway Cyber-Physical Systems Using AADL // Advanced Technologies, Embedded and Multimedia for Human-centric Computing. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer. 2013. Vol. 260. P. 377.
2. *Lee E.A., Seshia S.A.* Introduction to embedded systems, A Cyber-Physical Systems approach. 2nd edn. The MIT Press, USA. 2017.
3. *Kontseptsiia razvitiia sistem diagnostiki i monitoringa ob'ektov putevogo khoziaistva na period do 2025 goda* [The concept of development of systems for diagnostics and monitoring of track facilities for the period up to 2025]. <https://docs.cntd.ru/document/420365526?marker=6540IN> (accessed July 29, 2021).
4. *Pavlenko V.V.* A system for determining the pre-failure state of a continuous welded track to ensure the safety of train traffic // Transport Rossiiskoi Federatsii. 2011. No. 5(36). P. 31–33.
5. *Yi H., Kai L.* Inspection and monitoring technologies of transmission lines with remote sensing. Academic Press. 2017. P. 530.
6. *Wei J., Liu C., Ren T., Liu H., Zhou W.* Online condition monitoring of a rail fastening system on high-speed railways based on wavelet packet analysis // Sensors. 2017. Vol. 17 (2). P. 318.
7. *Bombarda D., Vitetta G.M., Ferrante G.* Rail Diagnostics Based on Ultrasonic Guided Waves: An Overview // Appl. Sci. 2021. Vol. 11(3), 1071.
8. *Feng H., Jiang Z., Xie F., Yang P., Shi J., Chen L.* Automatic fastener classification and defect detection in vision-based railway inspection systems // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. 2014. Vol. 63(4). P. 877–888.

* *Sergey P. Orlov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

Nikolai A. Efimushkin, student.

Natalia V. Efimushkina (PhD (Techn.)), Associate Professor.

9. *Karakose M., Yaman O., Akin E., Baygin M., Murat K.* A new computer vision based method for rail track detection and fault diagnosis in railways // *Int. Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2017. Vol. 6(1). P. 22–27.
10. *Andronchev I.K., Tarasov E.M., Bulatov A.A. et al.* A Technique for Diagnosis of the Resistance of Conductive Rail Track Joints // *Russian Electrical Engineering*. 2020. Vol. 91. P. 149–152.
11. *Faghih-Roohi S., Hajizadeh S., Nunez A., Babuska R., De Schutter B.* Deep convolutional neural networks for detection of rail surface defects // *Proc. of the 2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. 2016. P. 2584–2589.
12. *Orlov S.P., Girin R.A., Piletskaya A.V.* Intelligent information processing system for monitoring rail tracks // *Proceedings of International Conference on control problems in technical systems (CTS 2019)*, St. Petersburg, Russia. 2019. P. 302–305.
13. *Orlov S.P., Piletskaya A.V., Kusakina N.M., Tyugashev A.A.* Machine learning diagnostic neural network for railway track monitoring // *Mathematical methods in engineering and technology: International Conference*. St. Petersburg, Politechnical University, 2020. Vol. 3. P. 94–99.
14. Relsovye styki. Lokomo. Zheleznodorozhnyi put. [Rail joints. Lokomo. Railway track]. URL: <https://lokomo.ru/zheleznodorozhnyy-put/relsovye-styki.html> (accessed December 27, 2021).
15. Keras: The Python Deep Learning library. URL: <https://keras.io/applications/> (accessed January 10, 2022).
16. *Simonyan K., Zisserman A.* Very deep convolution networks for large-scale image recognition // 2014. arXiv:1409.1556.
17. *Kingma D.P., Ba J.L.* Adam: a method for stochastic optimization // 2017. arXiv:1412.6980v9 [cs.LG].
18. *Gupta V., Murzova A.* Keras Tutorial: Transfer Learning using pre-trained models // *Learn OpenCV*. 2021. URL: <https://learnopencv.com/keras-tutorial-transfer-learning-using-pre-trained-models> (accessed December 20, 2021).
19. *Zeng N.* RetinaNet Explained and Demystified. 2018. URL: <https://blog.zenggyu.com/en/post/2018-12-05/retinanet-explained-and-demystified> (accessed December 25, 2021).
20. *Mingxing Tan, Quoc V. Le.* EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks//2019. arXiv:1905.11946v5 [cs.LG].

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 681.391:543/545

СГЛАЖИВАНИЕ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПУТЕМ ИХ АППРОКСИМАЦИИ В БАЗИСЕ ФУНКЦИЙ ЧЕБЫШЕВА – ЭРМИТА

А.В. Бочкарев, Р.Т. Сайфуллин *

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: bochkarevpubliciit@gmail.com

Аннотация. Целью настоящей работы является оценка применимости аппроксимационного алгоритма сглаживания хроматографических сигналов в базисе функций Чебышева – Эрмита. Для аппроксимации используется алгоритм, подразумевающий вычисление коэффициентов сдвига и масштаба для функций базиса, а также деление сигнала на фрагменты. Рассматривается погрешность сглаживания модельного сигнала при его аппроксимации в выбранном базисе в сравнении с цифровым фильтром скользящего среднего. Также исследуется погрешность сглаживания производной сигнала и положения на производной экстремумов, производится сравнение, как и в прошлом случае, с цифровым фильтром скользящего среднего. В рамках экспериментального исследования в работе подвергаются обработке девять наиболее характерных хроматографических пиков, извлеченных из реальных хроматограмм. Для оценки качества сглаживания сравниваются среднеквадратичные отклонения шума и остатка, а также определяется закон распределения остатка. По результатам исследования устанавливаются ограничения по максимально допустимому значению коэффициента асимметрии обрабатываемых хроматографических пиков. Благодаря использованию выбранного аппроксимационного подхода удается решить задачу сглаживания хроматографических сигналов без ослабления полезной составляющей. Для вычислений и графического представления результатов моделирования использована система компьютерной алгебры Wolfram Mathematica 11.3.

Ключевые слова: функции Чебышева – Эрмита, сглаживание, случайная помеха, СКО, хроматографический сигнал, преобразование сигналов, аппроксимационный метод, хроматография.

* Андрей Владимирович Бочкарев, аспирант, старший преподаватель кафедры «Информационно-измерительная техника».

Раухат Талгатович Сайфуллин, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника», доктор технических наук, профессор.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90014.

Введение

Одной из задач обработки хроматографических сигналов является сглаживание или подавление помехи. На практике сглаживание чаще всего реализуют различными цифровыми фильтрами. Проблемой цифровой фильтрации является тот факт, что частотный спектр пиков хроматограммы, как правило, частично совпадает со спектром помехи и вместе с подавлением помехи происходит ослабление полезной составляющей, приходится либо снижать сглаживающие свойства фильтра, либо пытаться восстановить потерянную при сглаживании информацию [1]. Фильтр Савицкого – Голея решает проблему ослабления полезной составляющей, но осуществляет сглаживание менее эффективно, причем степень сглаживания зависит от подхода к расчету параметров фильтра [2]. Фильтр Калмана имеет лучшие сглаживающие свойства, чем фильтр Савицкого – Голея, но подразумевает существенную зависимость от формы шума, выходной сигнал фильтра может иметь фазовые и прочие нелинейные искажения [3, 4]. Сплайн-фильтры эффективно подавляют помеху с учетом гладкости полезного сигнала и при сравнении превосходят фильтр Калмана, но имеют значительную зависимость погрешности от метода расчета коэффициентов сплайна [4–6]. Фильтр Винера также эффективно сглаживает пики хроматограммы, но вызывает осцилляции, обусловленные краевыми эффектами; трудностью являются одновременно хорошее сглаживание и низкие осцилляции [3]. Таким образом, актуальным является вопрос разработки нового математического метода сглаживания хроматографических сигналов.

В настоящей работе для создания такого метода предлагается воспользоваться аппроксимацией сигналов в базисе функций Чебышева – Эрмита (за рубежом просто Эрмита). При этом из коэффициентов аппроксимации в данном базисе возможно восстановить по другим, предварительно рассчитанным базисам не только сам сигнал [7], но и его производную различных порядков [7, 8], вейвлет-преобразование [9, 10] и т. п. Функции Чебышева – Эрмита находят широкое применение в науке и технике. Разложение по данным функциям используется для аппроксимации двумерных [11] и одномерных [12] сигналов и аналитически заданных функций, обработки файлов мультимедиа форматов, в частности для выделения границ зашумленного изображения [13], биометрической идентификации по изображению радужки глаза человека [14], фильтрации и поиска изображения по базе данных, индексации говорящего по записи голоса [15], извлечения полезной медицинской информации из изображений компьютерной томографии [16] и распознавания речи [17]. Помимо этого, данные функции используются для построения банка фильтров [18], диагностики состояния оборудования [19] и здоровья человека [20], обнаружения полезных составляющих в сигнале [21], а также для решения дифференциальных уравнений [22, 23].

Аппроксимация сигналов в базисе функций Чебышева – Эрмита

Функции Чебышева – Эрмита определяются следующим образом:

$$\varphi_n(x) = \frac{1}{\alpha_n} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} \cdot H_n(x), \quad (1)$$

где $\alpha_n = \sqrt{2^n n! \sqrt{\pi}}$ – нормирующая константа; $H_n(x)$ – полином Эрмита n -го порядка;

$$H_n(x) = (-1)^n e^{x^2} \frac{d^n e^{-x^2}}{dx^n}. \quad (2)$$

Набор функций $\varphi_n(x)$ (1) задает базис для кодирования и декодирования сигналов. Представление сигнала $f(x)$ с помощью $N+1$ функций разложения (алгоритм кодирования) заключается в нахождении коэффициентов c_n . В силу локализации функций Чебышева – Эрмита нахождение данных коэффициентов можно свести к формуле:

$$c_n = \int_{-\tau_n}^{\tau_n} f(x) \cdot \varphi_n(x) dx, \quad n = 0, 1, \dots, N, \quad (3)$$

где $[-\tau_n, \tau_n]$ – отрезок, на котором локализована функция $\varphi_n(x)$.

Алгоритм декодирования с помощью $N+1$ коэффициентов, в результате которого восстанавливается аппроксимированный сигнал, выражается формулой:

$$\hat{f}(x) = \sum_{n=0}^N c_n \cdot \varphi_n(x). \quad (4)$$

Описанный алгоритм кодирования-декодирования обладает сглаживающим свойством [18] и позволяет получить не только сглаженный сигнал, но также и его сглаженную производную k порядка при наличии соответствующего базиса. Формируя различные базисы перехода от коэффициентов разложения (4) к различным преобразованиям, можно получить универсальный аппарат для быстрого получения также коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования, устранения аппаратной функции прибора и т. д. Для восстановления необходимого преобразования сигнала требуется заменить в (4) $\varphi_n(x)$ на соответствующее преобразование данной функции и вычислить полученную формулу относительно рассчитанных для исходного сигнала коэффициентов разложения (4) [7].

Одной из отличительных черт функций Чебышева – Эрмита является их локализация на временной оси. Данное обстоятельство может создать трудности при кодировании сигналов большой длительности – даже при простой их конфигурации (6 и менее точек перегиба) для кодирования в рассматриваемом базисе потребуются функции высоких порядков, вычисление которых затруднительно; трудность вычисления только нарастает с ростом порядка функции.

Очевидным решением является масштабирование функций Чебышева – Эрмита на некоторый коэффициент γ . Помимо этого наилучших результатов кодирования можно достичь, если положение максимума в сигнале будет совпадать с началом координат базисных функций, что обусловлено наибольшим перекрытием областей локализации исследуемого сигнала и базисных функций. Следовательно, требуется ввести и коэффициент сдвига для данных функций, в настоящей работе обозначенный как x_0 . Тем самым формируется новый базис функций

$\varphi_n\left(\frac{x-x_0}{\gamma}\right)$. Для восстановления нормировки базиса был рассчитан коэффициент

$\sqrt{1/\gamma}$, на который умножается и результат кодирования, и результат декодирования. Тем самым можно вынести множитель $1/\gamma$ в выражение для вычисления коэффициентов кодирования, которое при этом следует записать:

$$c_n = \frac{1}{\gamma} \int_{-\tau_n}^{\tau_n} f(x) \varphi_n \left(\frac{x-x_0}{\gamma} \right) dx. \quad (5)$$

С учетом описанных масштабных коэффициентов был разработан алгоритм аппроксимации сигналов в базисе функций Чебышева – Эрмита (рис. 1). Помимо вычисления коэффициентов масштаба и сдвига в ходе данного алгоритма происходит деление сигнала на фрагменты, что снижает погрешность аппроксимации [24].

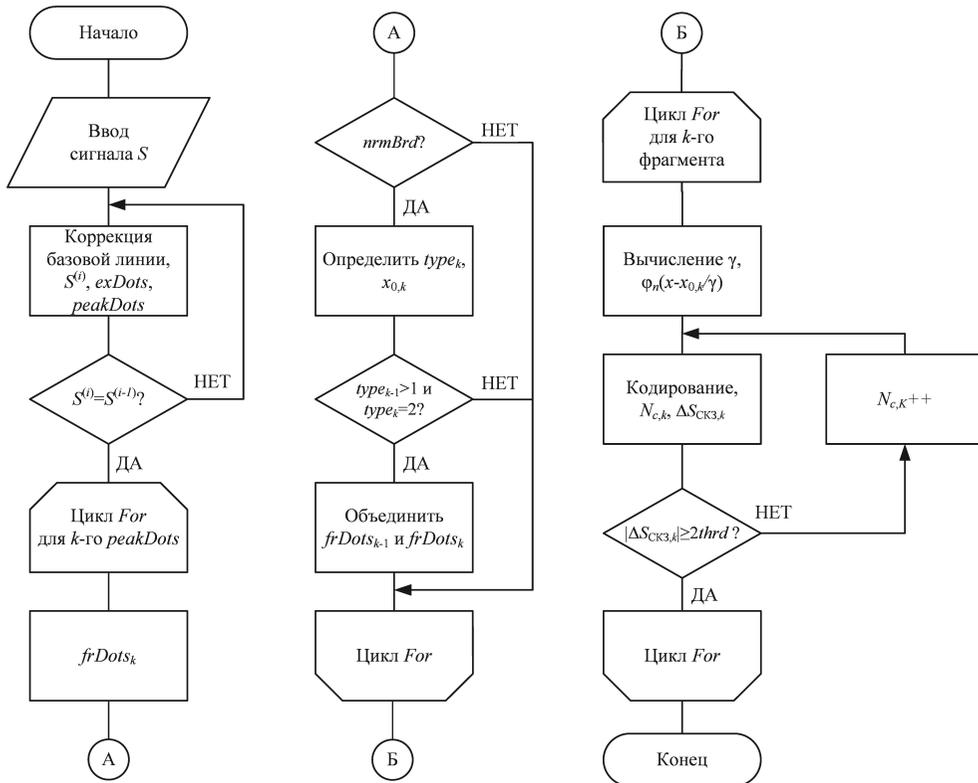


Рис. 1. Алгоритм аппроксимации

Для решения различных задач первичной обработки в хроматографии используются сглаженные производные хроматографических сигналов. Как было сказано выше, при аппроксимации сигналов в базисе функций Чебышева – Эрмита можно аппроксимировать также преобразования этого сигнала; для получения производной требуется вычислить производную функций Чебышева – Эрмита, получив выражение

$$\frac{d^k \varphi_n \left(\frac{x-x_0}{\gamma} \right)}{dx^k} = \frac{1}{\gamma^k} \sum_{m=0}^{\min(k,n)} \left[C_k^m (-1)^{k-m} \sqrt{\frac{2^m n!}{(n-m)!}} He_{k-m} \left(\frac{x-x_0}{\gamma} \right) \varphi_{n-m} \left(\frac{x-x_0}{\gamma} \right) \right], \quad (6)$$

которое задает базис производной k порядка n -й функции Чебышева – Эрмита с учетом масштаба γ и сдвига x_0 и может быть использовано для восстановления k -й сглаженной производной исходного сигнала по рассчитанным заранее

коэффициентам разложения в базе Чебышева – Эрмита, если вынести за знак суммы нормировочный коэффициент:

$$\frac{d^k \hat{f}(x)}{dx^k} = \frac{1}{\gamma^k} \sum_{n=0}^N c_n \cdot \frac{d^k \varphi_n \left(\frac{x-x_0}{\gamma} \right)}{d \left(\frac{x-x_0}{\gamma} \right)^k}, \quad (7)$$

где $\frac{d^k \hat{f}(x)}{dx^k}$ – оценка k -й сглаженной производной сигнала $f(x)$; c_n – коэффициенты кодирования (5) сигнала $f(x)$ в базе функций Чебышева – Эрмита.

Подавление случайной помехи

Аппроксимация сигналов в базе функций Чебышева – Эрмита обладает сглаживающими свойствами, что позволяет устранять случайную помеху. На рис. 2 представлен пример сглаживания реального хроматографического сигнала с предварительным его делением на фрагменты по алгоритму рис. 1. Начальный и конечный фрагменты классифицируются как шум, поэтому на рис. 2 данные области обнулены.

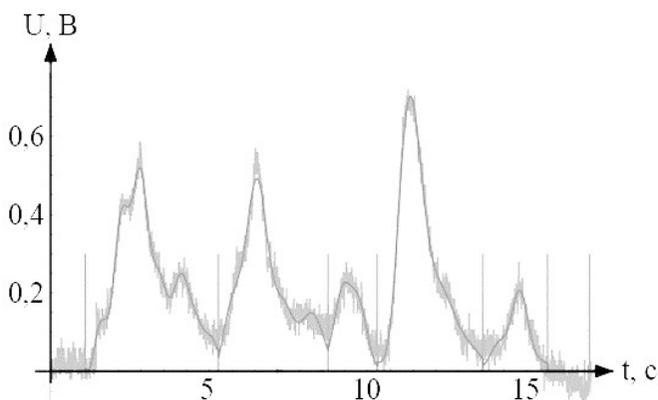


Рис. 2. Пример сглаживания хроматографического сигнала

Для оценки эффективности устранения помехи относительно описанных в первой главе методов было произведено сравнение результата декодирования сглаженного сигнала по коэффициентам базиса функций Чебышева – Эрмита со сглаженным сигналом, полученным при использовании наиболее распространенного на практике метода сглаживания – фильтра скользящего среднего:

$$L_k(N) = \frac{1}{N} \sum_{k=-0,5(N-1)}^{0,5(N-1)} \zeta(i,k) S_{i-k}, \quad (8)$$

где

$$\zeta(i,k) = \begin{cases} 1, & \text{если } (i-k > 0) \vee (i-k \leq M), \\ \text{иначе } 0, & \end{cases} \quad (9)$$

N – порядок фильтра (только нечетное число); Δx – интервал дискретизации сигнала.

При исследованиях был задан сигнал S , полученный дискретизацией пика, заданного выражением

$$f(t) = Ae^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (10)$$

где A – амплитуда пика; μ – время удерживания пика; σ – среднеквадратичная ширина пика [25].

На полученный сигнал накладывалась сгенерированная псевдослучайная помеха с нормальным законом распределения и различным СКО помехи σ . При разных σ достигалось разное отношение сигнал/шум (ОСШ):

$$\text{ОСШ} = 20 \lg \left(\frac{S_{\text{СКЗ}}}{n_{\text{СКЗ}}} \right), \quad (11)$$

где $S_{\text{СКЗ}}$ – среднеквадратическое значение сигнала; $n_{\text{СКЗ}}$ – среднеквадратическое значение помехи.

Оценка погрешности сглаженного сигнала производилась по выражению

$$\delta = \max \left(\frac{\hat{S}_i - S_i}{\max(S_i)} \right) \cdot 100\%, \quad (12)$$

где \hat{S} – сглаженный сигнал; S – исходный сигнал до наложения помехи; $\hat{S}_i - S_i$ – разность i -х значений сглаженного и исходного сигналов.

На рис. 2 данное сравнение представлено в виде графиков, где a – сглаживание с применением цифрового фильтра N порядка, b – путем восстановления сигнала по коэффициентам кодирования N порядка (максимальный порядок функции) в базисе функций Чебышева – Эрмита.

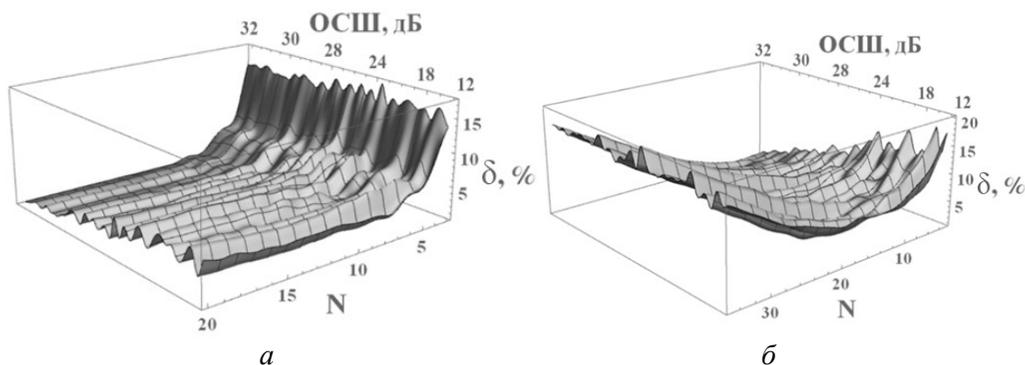


Рис. 3. Сравнение сглаживания с цифровым фильтром

По рис. 3, b можно видеть, что при больших значениях ОСШ цифровой фильтр малого порядка обеспечивает низкую погрешность ($\delta < 1\%$), но со снижением ОСШ повышение порядка не дает снижения погрешности, поскольку, как было сказано в первой главе, вместе с помехой происходит ослабление полезной составляющей. Для сглаживания в базисе функций Чебышева – Эрмита видна иная картина – по достижении минимально необходимого порядка (в данном случае – $N = 8$) обеспечивается $\delta < 1\%$ и со снижением ОСШ погрешность растет значительно медленнее, чем при использовании цифрового фильтра.

Поскольку помимо самих сигналов сглаживание требуется (и в большей степени) при вычислении их производных, для того же S была оценена погрешность вычисления производных первого и второго порядка относительно численно определенной производной [26] по сглаженному цифровым фильтром сигналу. Для оценки погрешности использовалось выражение (12) с заменой сигнала на его производную (как в случае исходного, так и в случае сглаженного сигнала). Результаты представлены на рис. 4, где a и b – соответственно первая и вторая производные, полученные численно по сглаженному цифровому сигналу, \bar{b} и \bar{z} – восстановленные по базису (7) сглаженные производные.

По данному рисунку можно видеть, что применение цифрового фильтра не позволяет обеспечить погрешность $\delta < 50\%$ для обеих производных даже при больших значениях ОСШ, а с его уменьшением ситуация меняется только в сторону ухудшения. Увеличение порядка фильтра не дает существенных результатов, позволяя вернуться лишь к начальному значению погрешности $\delta \approx 50\%$. Применение сглаживания в базисе функций Чебышева – Эрмита дает иные результаты: при достижении минимально необходимого порядка (в данном случае – $N=8$) обеспечивается $\delta < 1\%$ для обеих производных, но при снижении ОСШ погрешность возрастает до $\delta \approx 10\%$.

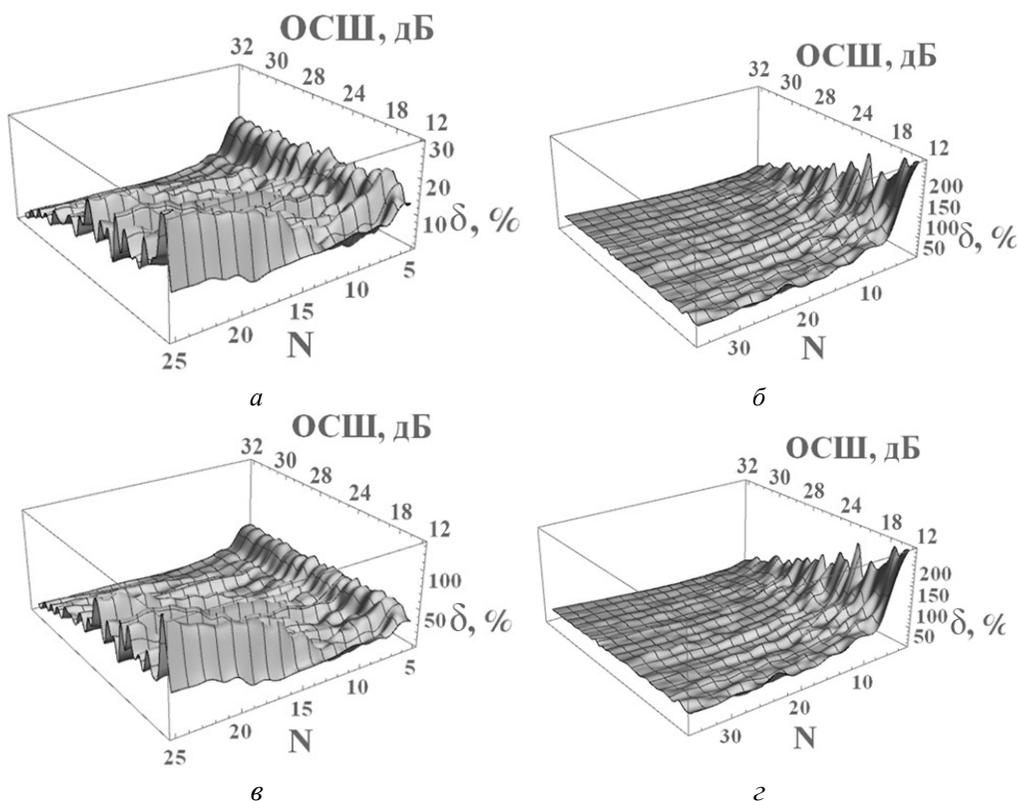


Рис. 4. Сравнение погрешности восстановления производной

Тем не менее для производной имеет значение не только погрешность аппроксимации (см. рис. 4), но и погрешность положения экстремумов, по которым производится определение положения вершины и границ пиков. Поэтому ниже рассматривается погрешность восстановления экстремумов

производных первых двух порядков с применением цифрового фильтра и базиса функций Чебышева – Эрмита, для чего используется выражение

$$\delta = \frac{\left| \text{ex} \left[\hat{S}^{(n)} \right] - \text{ex} \left[S^{(n)} \right] \right|}{\text{ex} \left[S^{(n)} \right]} \cdot 100\%,$$

где $\text{ex}[\cdot]$ – функция для вычисления положения экстремума; $\hat{S}^{(n)}$ – восстановленная по функциям Чебышева – Эрмита производная n порядка; $S^{(n)}$ – полученная при цифровой фильтрации производная n порядка.

В качестве экстремумов рассматриваются наиболее применяемые на практике точки: положение прохода через ноль для первой производной и положение минимума второй производной [1]. Результаты представлены на рис. 5.

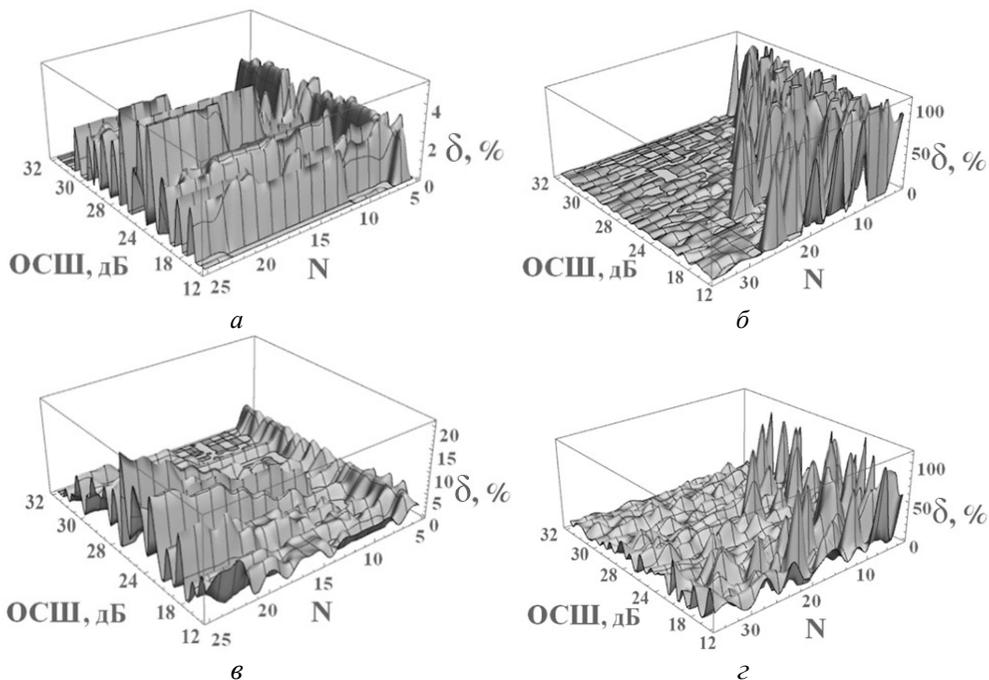


Рис. 5. Сравнение погрешности восстановления экстремумов производных

Можно видеть, что применение цифровой фильтрации позволяет сохранить положение экстремумов при достижении определенного N (при котором согласно рис. 5 возрастает погрешность аппроксимации производной) с $\delta < 5\%$ для первой производной и с $\delta < 10\%$ для второй. Восстановление сглаженной производной в базисе функций Чебышева – Эрмита при достижении $N=8$ обеспечивает для большинства значений ОСШ близкую к нулю погрешность, которая на малых его значениях растет до $\delta < 3\%$ для первой производной и

$\delta < 5\%$ для второй. Таким образом, подавление помехи в используемом базисе обеспечивает снижение погрешности относительно традиционного метода.

Погрешность восстановления одиночных пиков

Для оценки погрешности представленного метода были аппроксимированы пики реальных хроматограмм. Хроматограммы были извлечены из программы Хроматэк Аналитик 3.1. Все они были получены на хроматографе Кристалл-5000 с пламенно-ионизационным детектором.

Из полученных хроматограмм были извлечены 9 наиболее характерных пиков, конфигурация которых наиболее часто встречается в реальных хроматограммах (рис. 6). Многие пики на практике близки по форме к гауссиане, но с небольшой разницей в крутизне фронтов; при выборе пиков для обработки были собраны наиболее часто встречаемые асимметричные конфигурации, которые, как правило, являются одиночными. Для оценки зависимости погрешности отклонения пика от симметричной гауссианы (как наиболее простой для обработки модели) был использован метод моментов, на основе которого вычислялись коэффициенты асимметрии γ_1 и эксцесса γ_2 [27]:

$$m_0 = \Delta x \sum_{i=1}^M S_i, \quad m_1 = \frac{\Delta x^2}{m_0} \sum_{i=1}^M S_i (i-1), \quad m_n = \frac{\Delta x}{m_0} \sum_{i=1}^M S_i [(i-1)\Delta x - m_1]^n, \quad n > 1,$$

$$\gamma_1 = \frac{m_3}{m_2^{3/2}}, \quad \gamma_2 = \frac{m_4}{m_2^2} - 3.$$

Для оценки эффективности сглаживания проведена проверка закона распределения шума остатка, являющегося разностью исходного и аппроксимированного в базисе функций Чебышева – Эрмита сигналов (при отсутствии существенных отклонений аппроксимированного сигнала от действительного закон распределения остатка должен совпадать с законом распределения помехи и быть нормальным). Эффективность сглаживания также оценена численно посредством сравнения СКО шума в пустой области исходного сигнала и СКО озвученного остатка, а также по закону распределения остатка.

Результаты приведены в таблице. Закон распределения помехи в пустых областях исходных сигналов совпадает с законом распределения остатка. Математическое ожидание равно нулю во всех случаях, поэтому в таблице не приводится. Почти для всех рассматриваемых сигналов помеха описывается нормальным законом, для других – законом Коши или логистическим законом, которые отличны от нормального плавностью фронтов, но приближенно являются сопоставимыми с нормальным. Гистограммы распределения помехи для некоторых сигналов приведены на рис. 7.

Разделение симметричных пиков

Пик	γ_1	γ_2	СКО шума сигнала	СКО остатка	Закон распределения шума сигнала
№ 1	0,10	0,42	$1,72 \cdot 10^{-2}$	$1,47 \cdot 10^{-2}$	Нормальный
№ 2	-0,69	-3,59	$1,54 \cdot 10^{-2}$	$1,76 \cdot 10^{-2}$	Нормальный
№ 3	0,79	1,02	$1,50 \cdot 10^{-2}$	$1,59 \cdot 10^{-2}$	Нормальный
№ 4	0,96	0,41	$1,97 \cdot 10^{-2}$	$1,57 \cdot 10^{-2}$	Нормальный
№ 5	0,97	0,78	$1,71 \cdot 10^{-2}$	$1,44 \cdot 10^{-2}$	Нормальный
№ 6	1,34	3,83	$0,91 \cdot 10^{-1}$	$1,14 \cdot 10^{-1}$	Нормальный
№ 7	1,53	3,38	$1,39 \cdot 10^{-2}$	$1,79 \cdot 10^{-2}$	Нормальный
№ 8	1,86	3,85	$1,55 \cdot 10^{-2}$	3,18	Коши
№ 9	2,37	8,78	$4,70 \cdot 10^{-2}$	$6,35 \cdot 10^{-1}$	Логистический

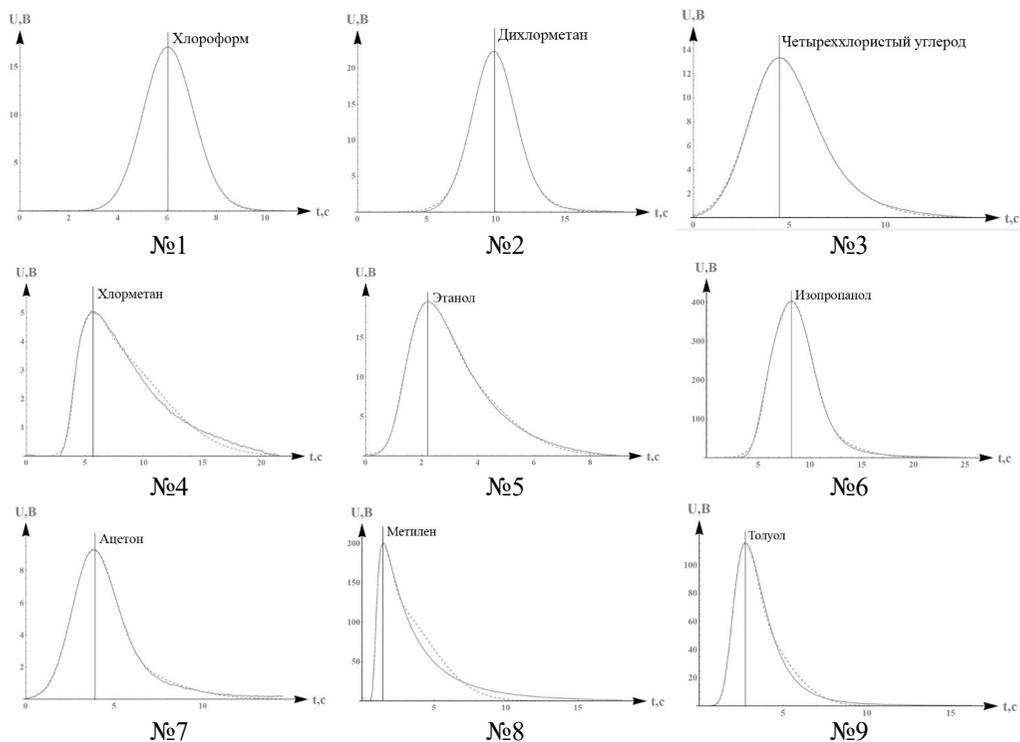


Рис. 6. Исследуемые реальные пики

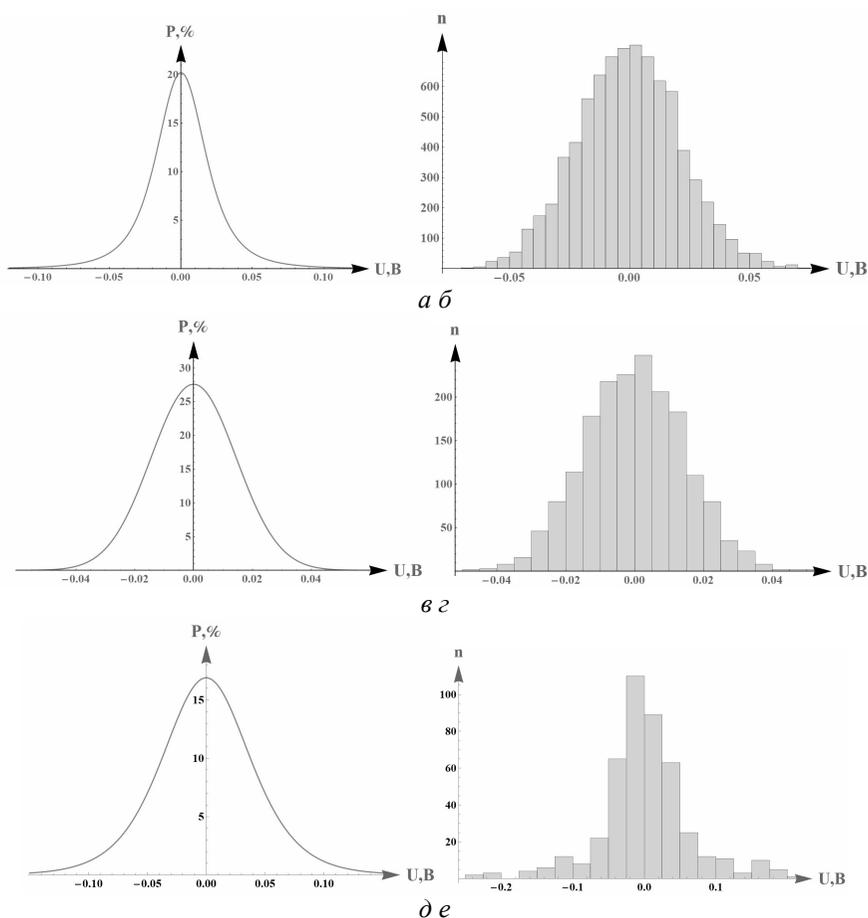


Рис. 7. Гистограммы распределения помехи: а, б – для пика № 8, распределение Коши; в, г – для остатка хроматограммы, нормальное распределение; д, е – для пика № 9, логистическое распределение

Выводы

Анализируя результаты, приведенные в таблице, можно видеть, что СКО шума совпадает порядком с СКО остатка во всех случаях, кроме пиков 8 и 9. Поскольку согласно рис. 6 помеха имеет существенно меньшую амплитуду по сравнению с полезным сигналом, можно положить, что совпадение порядков СКО шума и остатка говорит о низкой погрешности сглаживания. Следовательно, конфигурации пиков, подобных номерам 8 и 9, не могут быть аппроксимированы с достаточно низкой погрешностью, что является ограничением представленного метода. Соответственно предельным значением асимметрии для аппроксимированных одиночных пиков можно считать наибольшую асимметрию в таблице, не считая параметров пиков 9 и 10, $\gamma_{1\max} = 1,53$, а влияния γ_2 на качество аппроксимации не выявлено. С учетом сравнения качества сглаживания сигнала при использовании предложенного аппроксимационного метода и цифрового фильтра можно заключить, что аппроксимационный подход позволяет совместить высокую степень сглаживания и низкую погрешность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Felinger A.* Data Analysis and Signal Processing in Chromatography. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science B.V., 1998. 413 p.
2. *Savitzky A., Golay M.J.E.* Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures // *Anal. Chem.* 1964. Vol. 36. P. 1627–1639.
3. *Kalman R.E.* A New Approach to linear Filtering and Prediction Problems // *Trans ASME, Series D, J. BasicEng.* 1960. Vol. 82. P. 35–45.
4. *Гуторов А.С.* Математическое моделирование и исследование алгоритмов фильтрации при траекторной обработке данных по целям // *Автоматизация процессов управления.* 2015. № 1 (39). С. 34–40.
5. *Ланге П.К.* Сплайн-аппроксимация дискретных значений сигналов с применением методов цифровой фильтрации // *Вестн. Самар. госуд. технич. ун-та. Серия: Физ.-матем. науки.* 2003. Вып. 18. С. 87–93.
6. *Спирidonov A.B., Тиме И.В.* Применение сглаживающих сплайнов для фильтрации сильно зашумленных сигналов // *Автомат. и телемех.* 1998. Вып. 7. С. 75–82.
7. *Сайфуллин Р.Т., Бочкарев А.В.* Использование функций Чебышева – Эрмита в обработке сигналов аналитических приборов // *Вестн. Самар. госуд. технич. ун-та. Серия: Технич. науки.* 2019. 1(61). С. 68–81.
8. *Сайфуллин Р.Т., Бочкарев А.В.* Вычисление производных аналитического сигнала в базе функций Чебышева – Эрмита // *Материалы XI Всеросс. научн. конф. с междунар. участ. «Матем. моделир. и краевые задачи», 27-30 мая 2019. Самара, 2019. Т. 2. С. 137–139.*
9. *Сайфуллин Р.Т., Бочкарев А.В.* Вычисление непрерывного вейвлет-преобразования сигналов в базе функций Чебышева – Эрмита // *Вестн. Самар. госуд. технич. ун-та. Серия: Технич. науки.* 2019. 2(62). С. 99–113.
10. *Сайфуллин Р.Т., Бочкарев А.В.* Алгоритм вычисления коэффициентов вейвлет-преобразования сигналов с использованием базиса функций Чебышева – Эрмита // *Вестн. Самар. госуд. технич. ун-та. Серия: Технич. науки.* 2019. 4(64). С. 113–124.
11. *Beliczynski B.* A method of multivariable Hermite basis function approximation // *Neurocomputing.* 2012. Vol. 96. P. 12–18.
12. *Jung S.-M.* Approximation of analytic functions by Hermite functions // *Bulletin des Sciences Mathématiques.* 2009. Vol. 133. Issue 7. P. 756–764.
13. *Наджафи М.М.* Проекционный метод решения некоторых задач обработки и анализа изображений: специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. М., 2004. 110 с.
14. *Павельева Е.А.* Анализ и восстановление изображений проекционными методами, использующими функции Эрмита: специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. М., 2015. 130 с.
15. *Корчагин Д.Н.* Быстрый проекционный метод обработки мультимедиа информации: специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. М., 2005. 180 с.
16. *Мамаев Н.В., Лукин А.С., Юрин Д.В., Глазкова М.А., Синицин В.Е.* Алгоритм нелокального среднего на основе разложения по функциям Эрмита в задачах компьютерной томографии // *ГРАФИКОН'2013. Сб. трудов 23-й междунар. конф. по компьютерной графике и зрению, 16-20 сентября 2013. Владивосток, 2013. С. 254–258.*
17. *Баяковский Ю.М., Жирков А.О., Корчагин Д.Н., Крылов А.С., Лукин А.С.* Нейросетевой анализ и сопоставление частотно-временных векторов на основе краткосрочного спектрального представления и адаптивного преобразования Эрмита // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша.* 087. 2001.
18. *Балакин Д.А., Штыков В.В.* Построение ортогонального банка фильтров на основе преобразований Эрмита для обработки сигналов // *Журнал радиоэлектроники.* 2014. № 9. С. 1–15.
19. *Балакин Д.А., Штыков В.В.* Диагностика циклических систем с помощью алгоритма, основанного на функциях Гаусса – Эрмита // *Цифровая обработка сигналов.* 2018. № 2. С. 59–62.

20. Балакин Д.А., Штыков В.В., Чуркин С.С. Использование фазометрического комплекса диапазона КВЧ для диагностики жизнедеятельности человека // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2017. Т. 1. С. 127–132.
21. Балакин Д.А., Чуркин С.С., Штыков В.В. Обнаружение сигналов с использованием ортогонального базиса функций Гаусса – Эрмита // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2018. Т. 1, № 1. С. 48–61.
22. Яремко Н.Н. Функции Эрмита с разрывными коэффициентами и их применения для решения обратных задач теплопроводности // Известия Пензен. госуд. педагогич. ун-та им. В.Г. Белинского. 2011. № 26. С. 326–330.
23. Paranda K., Dehghanb M., Rezaei A.R., Ghaderi S.M. An approximation algorithm for the solution of the nonlinear Lane–Emden type equations arising in astrophysics using Hermite functions collocation method // Computer Physics Communications. 2010. Vol. 181. Issue 6. P. 1096–1108.
24. Сайфуллин Р.Т., Бочкарев А.В. Алгоритм определения положения границ хроматографических пиков в сигналах аналитических приборов // Молодежь и наука: шаг к успеху: сб. научн. статей 5-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых (22-23 марта 2021 года), в 4 т. 2021. Т. 3. С. 200–204.
25. Гуревич А.Л., Русинов Л.А., Сягаев Н.А. Автоматический хроматографический анализ. Л.: Химия, 1980. 192 с.
26. Слабнов В.Д. Численные методы. СПб.: Лань, 2020. 392 с.
27. Misra S., Wahab M., Patel D. The utility of statistical moments in chromatography using trapezoidal and Simpson's rules of peak integration // Journal of Separation Science. 2019. Vol. 42. DOI: 10.1002/jssc.201801131

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2021 г.

SMOOTHING OF CHROMATOGRAPHIC SIGNALS BY THEIR APPROXIMATION IN THE BASIS OF CHEBYSHEV-HERMITE FUNCTIONS

A.V. Bochkarev., R.T. Sayfullin *

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: bochkarevpubliciit@gmail.com

Abstract. *The paper deals with assessing the scope of the approximation algorithm for smoothing chromatographic signals. The algorithm is based on Chebyshev-Hermite functions. For approximation, an algorithm is used that implies the calculation of the shift and scale factors for the basis functions, as well as the division of the signal into fragments. The smoothing error of the model signal is considered when it is approximated in the selected basis in comparison with the digital moving average filter. The error of smoothing the derivative of the signal and the position on the derivative of extremums is also investigated, a comparison is made, as in the previous case, with a digital moving average filter. As part of an experimental study, the nine most characteristic chromatographic peaks extracted from real chromatograms are processed in the work. To assess the quality of smoothing, the standard deviation of the noise and the residual are compared, and the distribution law of the residual is determined. According to the results of the study, restrictions are set on the maximum allowable value of the asymmetry coefficient of the processed chromatographic peaks. Thanks to the use of the chosen approximation approach, it is possible to solve the problem of smoothing chromatographic signals without attenuating the useful component. The computer algebra system Wolfram Mathematica 11.3 was used for calculations and graphical presentation of the simulation results.*

Keywords: *Chebyshev-Hermite functions, smoothing, random noise, standard deviation, chromatographic signal, signal conversion, approximation method, chromatography.*

REFERENCES

1. *Felinger A.* Data Analysis and Signal Processing in Chromatography / A. Felinger. – Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science B.V., 1998. 413 p.
2. *Savitzky A.* Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures / A. Savitzky, M.J.E. Golay // *Anal. Chem.* 1964. Vol. 36. P. 1627–1639.
3. *Kalman R.E.* A New Approach to linear Filtering and Prediction Problems // *Trans ASME, Series D, J. BasicEng.* 1960. Vol. 82. P. 35–45.
4. *Gutorov A.S.* Mathematical modeling and research of filtering algorithms for trajectory processing of data by goals // *Automation of management processes.* 2015. No. 1(39). P. 34–40.
5. *Lange P.K.* Spline approximation of discrete values of signals using digital filtering methods // *Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Physical and mathematical sciences".* 2003. Issue 18. P. 87–93.
6. *Spiridonov A.V., Time I.V.* Application of smoothing splines for filtering highly noisy signals // *Avtomat. and telemekh.* 1998. 7. P. 75–82.
7. *Saifullin R.T., Bochkarev A.V.* Use of Chebyshev-Hermite functions in signal processing of analytical instruments // *Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Technical Sciences".* 2019. 1(61). P. 68–81.
8. *Saifullin R.T., Bochkarev A.V.* Calculation of derivatives of an analytical signal in the basis of Chebyshev-Hermite functions // *Proceedings of the XI All-Russian Scientific Conference*

* *Andrey V. Bochkarev, Postgraduate Student.*
Raukhat T. Sayfullin, Professor.

- with international participation "Mathematical modeling and boundary value problems", May 27-30, 2019, Samara. Samara, 2019. V. 2. P. 137–139.
9. *Saifullin R.T., Bochkarev A.V.* Calculation of continuous wavelet transform of signals in the basis of Chebyshev-Hermite functions // Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Technical Sciences". 2019. 2 (62). P. 99–113.
 10. *Saifullin R.T., Bochkarev A.V.* Algorithm for calculating the coefficients of the wavelet transform of signals using the basis of the Chebyshev-Hermite functions // Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Technical Sciences". 2019. 4(64). P. 113–124.
 11. *Beliczynski B.* A method of multivariable Hermite basis function approximation // Neurocomputing. 2012. Vol. 96. P. 12–18.
 12. *Jung S.-M.* Approximation of analytic functions by Hermite functions // Bulletin des Sciences Mathématiques. 2009. Vol. 133, 7. P. 756–764.
 13. *Najafi M.M.* Projection method for solving some problems of image processing and analysis: specialty 05.13.18 "Mathematical modeling, numerical methods and software packages": thesis for the degree of candidate of physical and mathematical sciences. Moscow State University M.V. Lomonosov. Moscow, 2004. 110 p.
 14. *Paveleva E.A.* Analysis and restoration of images by projection methods using Hermite functions: specialty 05.13.18 "Mathematical modeling, numerical methods and software packages": dissertation for the degree of Candidate of Physical and Mathematical. Moscow State University M.V. Lomonosov. Moscow, 2015. 130 p.
 15. *Korchagin D.N.* Fast projection method for processing multimedia information: specialty 05.13.18 "Mathematical modeling, numerical methods and software packages": dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences. Moscow State University M.V. Lomonosov. Moscow, 2005. 180 p.
 16. *Mamaev N.V., Lukin A.S., Yurin D.V., Glazkova M.A., Sinitsin V.E.* Algorithm of non-local average based on expansion in terms of Ermit functions in problems of computed tomography // GRAFIKON'2013. Proceedings of the 23rd International Conference on Computer Graphics and Vision, September 16-20, 2013, Vladivostok. Vladivostok, 2013. P. 254–258.
 17. *Bayakovskiy Yu.M., Zhirkov A.O., Korchagin D.N., Krylov A.S., Lukin A.S.* Neural network analysis and comparison of time-frequency vectors based on short-term spectral representation and adaptive Hermite transform // Preprints IPM them. M. V. Keldysh. 087. 2001.
 18. *Balakin D.A., Shtykov V.V.* Construction of an orthogonal filter bank based on Ermit's transformations for signal processing // Journal of radio electronics. 2014. 9. P. 1–15.
 19. *Balakin D.A., Shtykov V.V.* Diagnosis of cyclic systems using an algorithm based on Gauss-Hermite functions // Digital signal processing. 2018. 2. P. 59–62.
 20. *Balakin D.A., Shtykov V.V., Churkin S.S.* The use of the phase-metric complex of the EHF range for the diagnosis of human life // Electronics and microwave microelectronics. 2017. V. 1. P. 127–132.
 21. *Balakin D.A., Churkin S.S., Shtykov V.V.* Detection of signals using the orthogonal basis of Gauss-Hermite functions // Infocommunication and radio-electronic technologies. 2018. V. 1(1). P. 48–61.
 22. *Yaremko N.N.* Hermite functions with discontinuous coefficients and their applications for solving inverse problems of heat conduction // Proceedings of the Penza State Pedagogical University. V.G. Belinsky. 2011. 26. P. 326–330.
 23. *Paranda K., Dehghanb M., Rezaei A.R., Ghaderi S.M.* An approximation algorithm for the solution of the nonlinear Lane–Emden type equations arising in astrophysics using Hermite functions collocation method // Computer Physics Communications. 2010. Vol. 181(6). P. 1096–1108.
 24. *Saifullin R.T., Bochkarev A.V.* Algorithm for determining the position of the boundaries of chromatographic peaks in the signals of analytical devices // Youth and science: a step to success: collection of scientific articles of the 5th All-Russian scientific conference of promising developments of young scientists (March 22-23, 2021), in 4 volumes. 2021. V. 3. P. 200–204.
 25. *Gurevich A.L., Rusinov L.A., Syagaev N.A.* Automatic chromatographic analysis. L.: Chemistry, 1980. 192 p.
 26. *Slabnov V.D.* Numerical methods. St. Petersburg: Lan, 2020. 392 p.
 27. *Misra S., Wahab M., Patel D.* The utility of statistical moments in chromatography using trapezoidal and Simpson's rules of peak integration // Journal of Separation Science. 2019. Vol. 42. DOI: 10.1002/jssc.201801131

Электротехника

УДК 621.365

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТИ

*А.И. Данилушкин, В.А. Данилушкин**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: aidanilushkin@mail.ru

Аннотация. Рассматривается проблема разработки и исследования индукционной системы для нагрева вязких неэлектропроводных жидкостей в процессе транспортировки по трубопроводам. Специфической особенностью объекта исследования является сочетание процессов нагрева ламинарного потока жидкости в цилиндрическом индукторе и перемешивания в трехфазном индукторе – смесителе. Выполнены исследования взаимосвязанных электромагнитных, тепловых и электромеханических процессов в системах нагрева и перемешивания. Представлены результаты численного расчета электромагнитных и тепловых полей и электромагнитного момента вращения ротора в нагреваемой жидкости. Установлена связь между тепловой мощностью, выделяемой в элементах системы, и мощностью, идущей на вращение ротора. Приведены электромеханические (регулируемые) характеристики индукционного смесителя. Показано, что при соответствующем выборе конструктивных и режимных параметров индукционной системы можно найти требуемое соотношение между тепловой мощностью, выделяемой в элементах системы, и мощностью, идущей на перемешивание жидкости. Результаты проведенных исследований предназначены для решения задач проектирования конструкции индукционных систем для нагрева вязких жидкостей и эффективного управления процессом нагрева.

Ключевые слова: индукционный нагрев, математическая модель, теплообмен, температурное распределение, трубопроводный транспорт, управление, энергоэффективность.

Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами транспорта, в частности с перевозками по железной дороге, автоцистернами. Он более экономичен, безопасен и экологичен. Выигрыш в себестоимости по разным оценкам достигает 3–4-кратной величины, включая меньшие потери нефти.

* Александр Иванович Данилушкин, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», доктор технических наук, профессор.
Василий Александрович Данилушкин, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», кандидат технических наук, доцент.

Эффективность трубопроводного транспорта зависит от ряда факторов. К ним относится вязкость перекачиваемого продукта, от которой зависит производительность трубопроводной системы и энергозатраты на перекачку [1–4]. Одним из эффективных способов снижения энергозатрат на компримирование и увеличения пропускной способности трубопровода является снижение величины вязкости жидкости путем периодического подогрева с помощью путевых подогревателей, устанавливаемых с определенным интервалом вдоль магистрали. Подогрев осуществляется различными способами. Наиболее надежным и экологически чистым способом подогрева высоковязких и высокозастывающих нефтей в настоящее время является электроподогрев [6, 7].

В работах [5–9] рассматриваются вопросы расчета, проектирования и практического применения систем электрообогрева трубопроводов, резервуаров и технологического оборудования в нефтегазовой промышленности. Приведены описание и характеристики установок электрообогрева, работающих в различных отраслях промышленности. Однако вопросы моделирования и расчета охватывают ограниченный класс нагревателей с источниками энергии в виде греющих кабелей или индукционных систем с однослойной нагрузкой в виде металлической стенки резервуара или трубопровода.

В работах [10, 11] рассмотрена конструкция индукционного нагревателя для транспортировки высоковязких нефтей по магистральным трубопроводным системам. Предлагаемая конструкция нагревателя с осесимметричными трубами, в которых внутренняя труба служит в качестве вытеснителя, позволяет вдвое увеличить площадь теплообмена при минимальном поперечном сечении потока жидкости.

В работе [12, 13] выполнены исследования электромагнитных и тепловых процессов в установке технологического нагрева нефти при транспортировке по трубопроводам. Предложена конструкция многосекционного индукционного нагревателя для транспортировки высоковязких жидкостей, в частности высокопарафинистых нефтей. Показано, что вследствие низкой теплопроводности и высокой вязкости нефти при наличии технологических ограничений на максимальную температуру контактирующих поверхностей трубы и жидкости для трубопроводных систем высокой производительности индукционные нагреватели должны иметь несколько автономных секций с развитой поверхностью теплообмена.

Как следует из результатов исследований, такие свойства транспортируемой жидкости, как высокая вязкость, исключая возможность создания турбулентности при технологически возможных скоростях потока, и низкая теплопроводность обуславливают необходимость применения многосекционных индукционных нагревателей, длина которых составляет $12 \div 16$ м при требуемой температуре на выходе $50 \div 60$ град. [11, 13]. Задача усложняется наличием дополнительного ограничения на максимальную температуру пограничных, наиболее нагретых слоев жидкости.

Решение задачи снижения массогабаритных показателей и повышения эффективности индукционных нагревательных устройств возможно за счет интенсификации процесса теплообмена между источниками тепла и нагреваемой жидкостью. Интенсифицировать процесс теплообмена и таким образом повысить эффективность нагревательной системы можно либо путем создания турбулентности потока за счет высоких скоростей, либо путем перемешивания жидкости в нагреваемом потоке [14–17]. При практически реализуемых скоростях потока

нефти в трубопроводных системах имеет место ламинарное течение жидкости [17]. Средняя скорость потока составляет 2,8–3,3 м/с, причем вследствие высокой вязкости скорость по сечению потока распределена существенно неравномерно. Высокая скорость в средней части потока быстро падает к стенкам трубы. Пристенные слои потока прилипают к стенкам, а значительная величина вязкости способствует высоким касательным напряжениям между слоями и их торможению. При таких условиях создать турбулентность не представляется возможным.

Наиболее целесообразными в создавшейся ситуации являются разработка и применение многосекционной системы нагрева, которая состоит из чередующихся секций нагрева и перемешивания, соединенных последовательно (рис. 1).

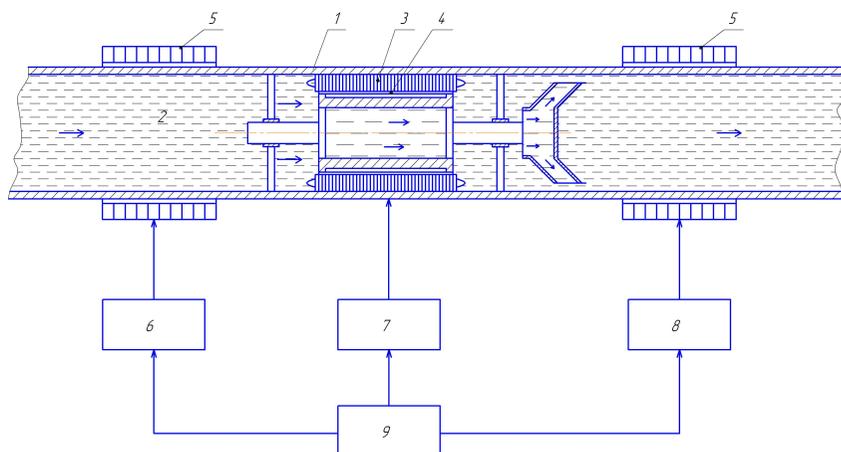


Рис. 1. Схема нагревательного модуля: 1 – трубопровод; 2 – нагреваемая жидкость; 3 – статор трехфазного индуктора; 4 – ротор; 5 – однофазные индукторы; 6, 7, 8 – регулируемые источники питания; 9 – система управления нагревом

В работе [18] рассмотрено устройство для нагрева и перемешивания вязкой жидкости, включающее наряду с индукционными нагревателями трехфазный индуктор-смеситель. Трехфазный индуктор расположен на трубе, в которой находится полый ротор с крыльчаткой смесителя.

Электрическая энергия, подводимая к индуктору, преобразуется в тепловую энергию в стенке трубы и в механическую энергию для перемешивания жидкости. Перемешивание жидкости осуществляется за счет вращения ротора под воздействием трехфазного электромагнитного поля статора. При этом часть энергии, передаваемой индуктором, выделяется в виде тепла в роторе, обеспечивая дополнительный подогрев жидкости.

Изменением частоты и напряжения источника питания можно регулировать соотношение между мощностью, идущей на нагрев, и мощностью, идущей на вращение крыльчатки. Однако наличие стальной трубы между статором и полым ротором существенно ограничивает диапазон регулирования этого соотношения. Кроме того, предложенное устройство имеет низкий коэффициент мощности и мягкую электромеханическую характеристику вращающего устройства, не позволяющую обеспечить необходимый диапазон регулирования частоты вращения крыльчатки смесителя при изменении производительности трубопровода или вязкости перекачиваемой жидкости.

В настоящей работе рассматривается новая конструкция устройства для нагрева и перемешивания, которая имеет высокий коэффициент мощности и одновременно повышает диапазон регулирования частоты вращения крыльчатки смесителя и связанное с этим соотношение между мощностью, идущей на нагрев, и мощностью на перемешивание. На рис. 2 представлен эскиз предлагаемой конструкции трехфазного индуктора.

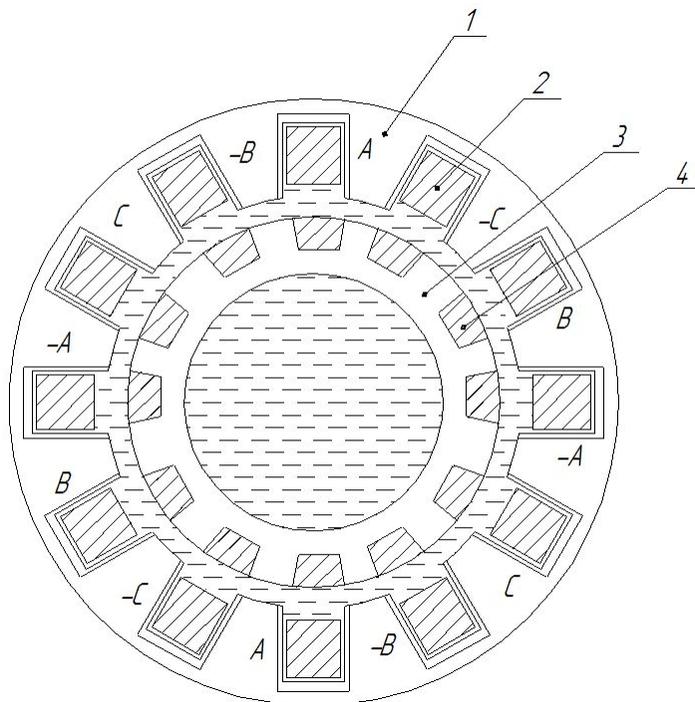


Рис. 2. Трехфазный индуктор с магнитопроводом:
1 – магнитопровод; 2 – обмотка статора; 3 – ротор; 4 – обмотка ротора

Для перемешивания слоев используется трехлопастная полая крыльчатка диагональной конструкции [19–21]. Центральная часть потока жидкости в полой крыльчатке лопастного колеса отклоняется к стенке трубы. Таким образом, объем жидкости, вошедший в лопастное колесо, попадает в пристенную область, вытесняя разогретый слой. Температура пристенного слоя снижается. Таким образом обеспечивается более интенсивная теплоотдача в жидкость. При этом вся энергия, подведенная к индуктору смесителя, также в конечном итоге преобразуется в тепло, обеспечивая дополнительный нагрев жидкости.

В следующей секции после смесителя пристенный слой жидкости вновь нагревается индуктором. В процессе перемешивания температура жидкости по сечению потока усредняется, и на входе следующего модуля температура пристенного слоя жидкости оказывается значительно ниже, чем температура стенки трубы. За нагревательной секцией процессы перемешивания и нагрева повторяются. Число модулей определяется производительностью трубопровода, вязкостью нефти и температурным режимом.

Такой способ, совмещающий нагрев и перемешивание в одном устройстве, позволяет значительно ускорить процесс нагрева жидкости с низкой теплопроводностью и уменьшить общую длину нагревателя. Соотношение между мощно-

стью нагрева и мощностью, идущей на вращение крыльчатки смесителя и перемешивание жидкости, зависит от частоты тока источника питания, реологических свойств транспортируемой жидкости, электрофизических свойств материала и конструктивных параметров системы.

Для расчета конструктивных и режимных параметров нагревательной системы учетом специфики предлагаемого устройства используется программный комплекс Comsol 5.2.

Так как электромагнитные процессы можно считать практически безынерционными по сравнению с тепловыми, решение электромагнитной и тепловой задач выполняется раздельно, что значительно упрощает и ускоряет процедуру расчета.

Учитывая периодичность конструкции, обусловленную чередованием пазов и зубцов магнитной системы, исходную математическую модель процесса индукционного нагрева в общем случае можно представить системой дифференциальных уравнений в частных производных для электромагнитного и теплового полей соответственно [11–13]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\mu_a(H(r,x,t),T)H(r,x,t))}{\partial t} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{1}{\sigma(T)} \frac{\partial H(r,x,t)}{\partial r} \right) - \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left(r \frac{1}{\sigma(T)} \frac{\partial H(r,x,t)}{\partial r} \right) = 0; \\ & \frac{\partial H(0,x,\tau)}{\partial r} = 0; \\ & c(T)\gamma \frac{\partial T(r,x,\theta,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda(T) \frac{\partial T(r,x,\theta,\tau)}{\partial \tau} \right) + \\ & + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(r,x,\theta,\tau)}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(r,x,\theta,\tau)}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{c(T)\gamma} W(r,x,\theta,\tau). \end{aligned}$$

Здесь $H(R,L,t)$ – вектор напряженности магнитного поля; μ_a – магнитная проницаемость; $\sigma(T)$ – электропроводимость; $\partial T(r,x,\theta,\tau)$ – температурное распределение в системе сопряженных тел; τ – время; $\lambda(T)$ – удельная теплопроводность; $W(r,x,\theta,\tau)$ – удельная мощность тепловыделения; $c(T)$ – удельная теплоемкость; γ – плотность, θ – угловая координата.

В качестве исходных данных для решения электромагнитной задачи вводятся: свойства сред, источники поля, распределенные и сосредоточенные токи, граничные условия, конструктивные параметры нагревателя, электрофизические характеристики материала труб, параметры индуктирующей катушки, размеры и характеристики магнитопровода, энергетические параметры – напряжение питания, частота тока.

Основными расчетными параметрами являются изменяющиеся во времени магнитный потенциал, магнитная индукция, напряженность поля, плотности токов, удельная тепловая мощность, вращающий момент.

Для расчета интегральных параметров индукционной системы использовалась двумерная постановка электромагнитной задачи в форме системы дифференциальных уравнений. Перейдя от системы уравнений Максвелла к формули-

ровке с использованием векторного магнитного потенциала, можно записать дифференциальное уравнение с соответствующими граничными условиями

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - j\omega g A = -j_{ext}; \quad A|_L = 0.$$

Здесь: A – векторный магнитный потенциал; μ_x, μ_y – относительная магнитная проницаемость материала по осям x, y ; j – мнимая единица; ω – круговая частота тока; g – удельная электрическая проводимость; L – граница расчетной области (линия удаленной поверхности); j_{ext} – плотность стороннего тока. На базе приведенных систем уравнений строится конечно-элементная формулировка для плоской двумерной области [23].

Граница раздела магнитных сред описывается системой соотношений:

$$\begin{aligned} B_{1n} &= B_{2n}; \\ \mu_1 H_{1n} &= \mu_2 H_{2n}; \\ H_{1\tau} - H_{2\tau} &= \frac{dI}{dl}. \end{aligned}$$

Последнее выражение учитывает скачкообразное изменение вектора напряженности $\{\bar{H}\}$ на границе раздела сред. Кроме условий сопряжения для получения однозначного решения уравнений Максвелла в форме напряженности электрического поля $\{\bar{E}\}$ и напряженности магнитного поля $\{\bar{H}\}$ в области $Q \subset R^3$ с границей S необходимо задать:

– уравнения поверхностей, отделяющих друг от друга среды i и j , $f_{ij}(x, y, z) = 0$;

– начальные величины $E_0(x, y, z), H_0(x, y, z)$ в момент времени t_0 в произвольной точке исследуемого объема $Q \subset R^3$ с границей S ;

– касательные составляющие вектора \bar{E} или \bar{H} в произвольной точке поверхности в произвольном временном интервале от t_0 до t , или распределения полей \bar{E} и \bar{H} вне исследуемого объема Q ;

– функциональные зависимости магнитной проницаемости μ и удельной проводимости γ от пространственных координат или от напряженности поля.

Решение задачи электромагнитного поля достигается использованием векторного магнитного потенциала $\{A\}$ и скалярного электрического потенциала V , которые выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} \{\bar{B}\} &= \text{rot}\{\bar{A}\}; \\ \{\bar{E}\} &= -\left\{ \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \right\} - \text{div}V. \end{aligned}$$

Чтобы функция $\{\bar{A}\}$ была определена, нужно определить значение ее дивергенции. Для этого добавляется условие, которое называется калибровкой Кулона:

$$\text{div}\{\bar{A}\} = 0.$$

В результате получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \left(\frac{1}{[\mu]} \operatorname{rot} \{ \bar{A} \} \right) + [\sigma] \frac{\partial \{ \bar{A} \}}{\partial t} &= \{ \bar{J} \}; \\ \operatorname{rot} \{ \bar{A} \} &= \{ \bar{B} \}; \\ \operatorname{div} \{ \bar{A} \} &= 0. \end{aligned}$$

Используя соотношение

$$\operatorname{rot} \left(\operatorname{rot} \{ \bar{A} \} \right) = \operatorname{grad} \left(\operatorname{div} \{ \bar{A} \} \right) - \nabla^2 \{ \bar{A} \},$$

при $\mu = \text{const}$ получим уравнение

$$\nabla^2 \{ \bar{A} \} - j\omega\sigma \{ \bar{A} \} - \{ \bar{J} \} = 0.$$

Уравнение Пуассона дополняется граничными условиями Дирихле и Неймана на различных участках границы:

$$\{ \bar{A} \} = 0 \text{ на } S_1; \quad \frac{\partial \{ \bar{A} \}}{\partial n} = 0 \text{ на } S_2.$$

Для учета нелинейной зависимости $\mu_a(H)$ в ферромагнитных областях используется итерационный алгоритм многократного решения результирующей системы уравнений. В начальной стадии расчета задается значение $\mu = \text{const}$ по всей области ферромагнитных макроэлементов, затем вычисляются распределенные параметры поля, что позволяет на следующей стадии расчета корректировать μ внутри каждого конечного элемента в зависимости от значения напряженности магнитного поля в данной области.

Численные эксперименты выполнены для устройства с параметрами, приведенными в табл. 1.

Полученные результаты позволяют выполнить анализ зависимости электромагнитных параметров индуктора – индукции магнитопровода, плотности тока в проводниках, объемной мощности тепловыделения в металлических элементах конструкции, вращающего момента и других характеристик – от геометрических и электрофизических характеристик системы, частоты и напряжения источника питания. На основании всестороннего анализа полученных зависимостей устанавливается закономерность и степень влияния электрических и геометрических параметров на энергетические характеристики системы. Полученные закономерности далее могут быть использованы при решении задачи выбора оптимальных параметров системы, обеспечивающей требуемые эксплуатационные характеристики в стационарных режимах работы установки.

На рис. 3 показано распределение плотности тока в элементах конструкции – в катушке индуктора, короткозамкнутой обмотке ротора и стальном теле ротора. Как следует из полученных результатов, наибольшая плотность тока достигается в поверхностных слоях обмотки индуктора и короткозамкнутой обмотки ротора.

Исходные данные

Наименование	Величина
Диаметр трубы, мм	169
Материал трубы, мм	Нержавеющая сталь
Толщина стенки трубы, мм	4,5
Диаметр цилиндрического ротора внешний, мм	82
Толщина стенки цилиндра, мм	12
Диаметр цилиндрического ротора внутренний, мм	58
Материал цилиндрического ротора	Ферромагнитная сталь
Размер паза (высота×ширина), мм	4×7
Размер зуба (высота×ширина), мм	4×7
Обмотка ротора	Шинка алюминиевая, 4×6
Количество пазов, шт.	12
Диаметр вала, мм	20
Диаметр статора внутренний, мм	86
Диаметр статора внешний, мм	158
Материал статора	Электротехническая сталь
Длина статора, мм	400
Размер паза (высота×ширина), мм	16×10
Размер зуба (высота×ширина), мм	16×10
Частота тока индуктора, Гц	50
Кол-во пазов, шт.	12

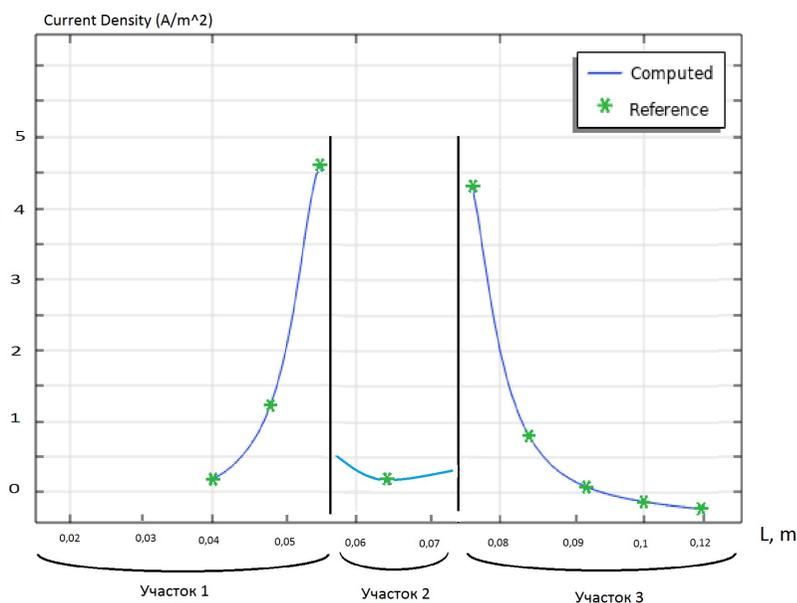


Рис. 3. Распределение плотности тока в элементах конструкции:
 1 – в катушке индуктора; 2 – в короткозамкнутой обмотке ротора;
 3 – в стальном теле ротора

В табл. 2 приведены интегральные характеристики исследуемого устройства. Коэффициент мощности индуктора при размещении статора внутри трубы увеличился по сравнению с известным аналогом в 2,7 раза и составил 0,65.

Характеристики трехфазного индуктора

Частота источника питания	50
Ток, А	6300
Напряжение, В	4,9
Момент, Н/м, кз	106,9
Частота вращения, об/мин, идеального холостого хода	314
Полная мощность, ВА	39 633
Мощность реактивная, ВАр	31 300
Полная активная мощность, Вт	26 372
Мощность на нагрев в роторе, Вт	15652
Мощность на вращение, Вт	10 744
Доля мощности на нагрев	0,44
$\cos \varphi$	0,65

Ниже приведены полученные в результате расчета электромагнитной задачи электромеханические характеристики трехфазного индуктора на рабочих частотах 50, 39 и 28 Гц. Как следует из результатов расчета и приведенных диаграмм (рис. 4), исследуемая конструкция имеет жесткую механическую характеристику, что позволяет обеспечить достаточно широкий диапазон регулирования частоты вращения.

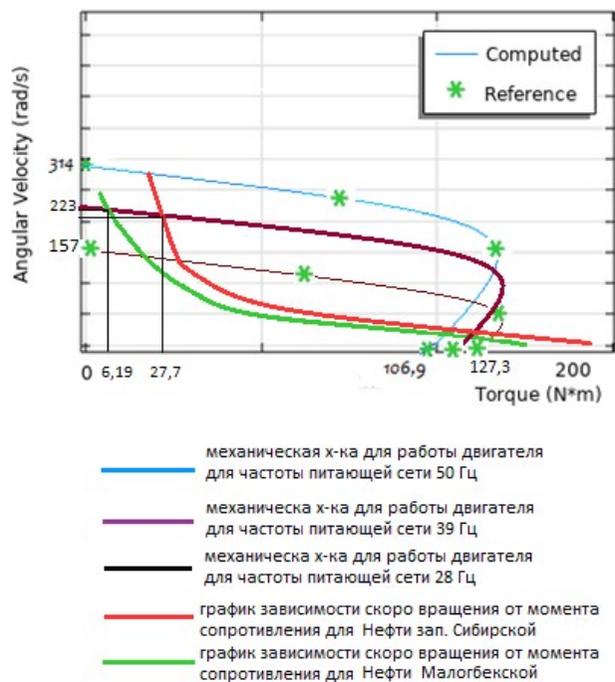


Рис. 4. Механические характеристики трехфазного индуктора

Величина диапазона регулирования частоты вращения ротора играет решающую роль при выборе оптимального режима работы смесителя в зависимости от изменения производительности трубопровода и вязкости нефти. Еще одно

преимущество заключается в возможности регулировать соотношение между мощностью, идущей на нагрев, и мощностью на вращение крыльчатки смесителя.

На этом же рисунке показаны нагрузочные характеристики исполнительного механизма (смесителя) в зависимости от вязкости нефти.

Еще одна проблема заключается в согласовании электромеханических характеристик трехфазного индуктора с характеристиками смесителя. Сложность состоит в отсутствии методики расчета момента вращения осевой крыльчатки в вязких средах. Необходимый для перемешивания нефти момент вращения рассчитывается по методике, предложенной в работе [23, 24]. Методика расчета основана на использовании коэффициентов приведения, устанавливающих связь между моментом вращения в воде и моментом вращения в вязкой среде. Алгоритм расчета представлен на рис. 5. На первом этапе выполняется расчет по методике, в которой в качестве рабочей жидкости рассматривается вода. Затем с использованием коэффициентов приведения производится пересчет мощности и момента для вязкой жидкости с учетом ее реальных характеристик.

Исходные данные, необходимые для расчета, приведены в табл. 3.

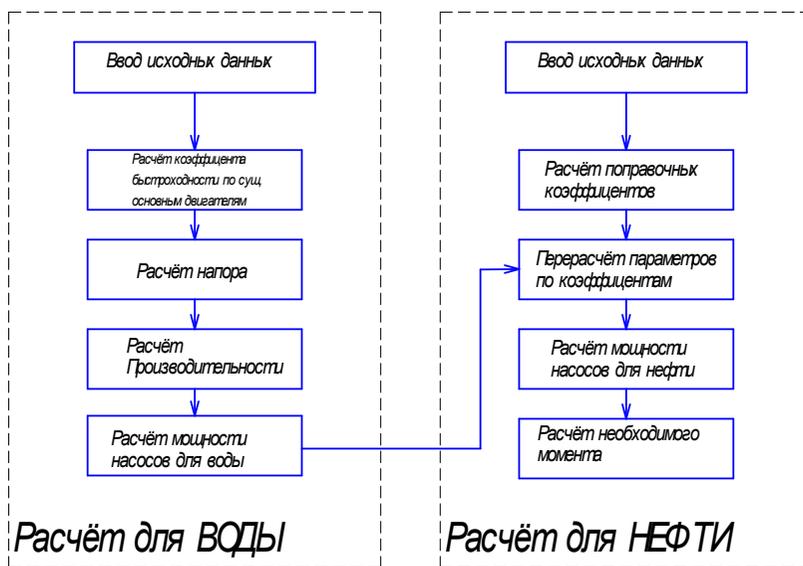


Рис. 5. Алгоритм расчета мощности и момента вращения

По исходным данным определяется напор, создаваемый насосом

$$H_{oc} = \frac{v_k^2}{2gk_n^2}$$

и скорость

$$V_c = k_v \sqrt{2gH_{oc}},$$

где $K_n^2 = 0,0244n_s^{0,66}$, n_s – коэффициент быстроходности.

Таблица 3

Исходные данные для расчета момента вращения

Наименование	Величина	Размерность	Обозначение
Скорость потока до установки	0,05	м/с	v_n
Скорость потока после установки	0,1	м/с	v_k
Давление потока до установки	10	кгс/см ²	p_n
Давление потока после установки	12	кгс/см ²	p_k
Коэффициент быстроходности	30		n_s
Угловая скорость	37	рад/с	ω
Плотность среды (вода)	1000	кг/м ³	ρ_v
Плотность среды (нефть)	920	кг/м ³	ρ_n
Вязкость (нефть)	4,5	см/сек ²	ν

Полезная мощность:

$$P_{пол} = \frac{Q_{ид} \rho_v g H_{oc}}{102},$$

где $Q_{ид}$ – идеальная подача осевого насоса:

$$Q_{ид} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) V_z,$$

где D – диаметр колеса; d – рекомендуемый диаметр ступицы; V_z – осевая скорость; $d = (0,4 \dots 0,5) D$; $V_z = k_v \sqrt{2gH_{oc}}$; $k_v = 0,055n_s^{0,66}$.

Мощность установки с учетом потерь:

$$P = 1,2 P_{пол}.$$

Для перерасчета параметров используются дополнительные конструктивные характеристики, приведенные в табл. 4.

Таблица 4

Данные для перерасчета на нефть

Наименование	Величина	Размерность	Обозначение
Толщина лопатки	0,03	м	b
Ширина лопатки	0,25	м	q
Число рядов лопаток	2	шт.	z

Определяется коэффициент стеснения:

$$K_2 = \frac{\pi D - qz}{\pi D} = \frac{t_2 - q}{t_2},$$

где t_2 – шаг лопаток.

Эквивалентный диаметр рабочего колеса:

$$D_{2экв} = \sqrt{4dbK_2}.$$

При максимальной идеальной подаче насоса находится число Рейнольдса для вязких жидкостей:

$$Re = \frac{Q_p}{D_{2экв} \nu}$$

Дальнейший расчет выполняется с помощью опытных поправочных коэффициентов K_n , K_q , K_η , которые при найденных числах Рейнольдса находятся из графика [23, 24] (рис. 6).

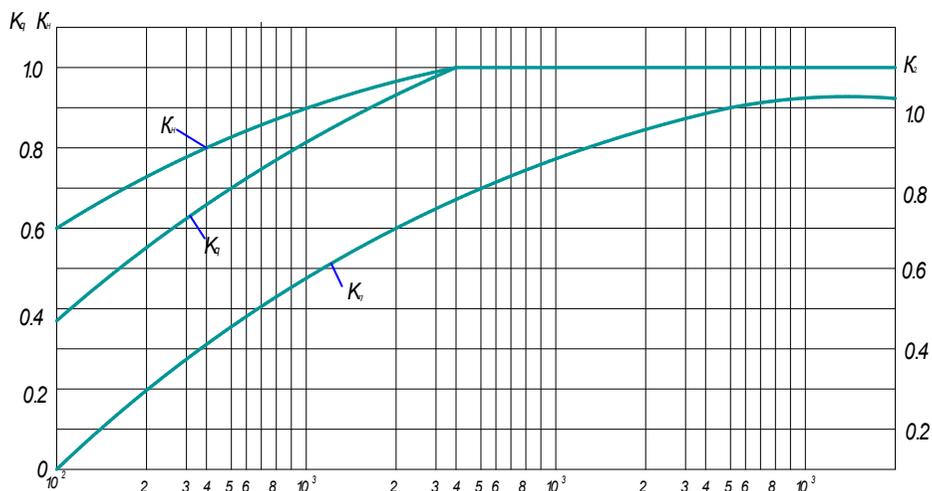


Рис. 6. Зависимость коэффициентов от числа Рейнольдса

С помощью полученных коэффициентов определяются значения подачи, напора и коэффициента полезного действия для вязкой жидкости:

$$Q_{в.жс.} = K_q Q; H_{в.жс.} = K_n H; \eta_{в.жс.} = K_\eta \eta.$$

Полезная мощность в среде с вязкой жидкостьюю:

$$P = \frac{Q_{в.жс.} H_{в.жс.} g \rho_{в.жс.}}{75 \eta_{в.жс.}}$$

По результатам расчета для исследуемого устройства с параметрами, приведенными в табл. 3, 4, определяется момент трогания.

По результатам расчета для исследуемого устройства с приведенными выше параметрами момент трогания составляет 51,4 Нм. По результатам расчета электромагнитной задачи момент трогания (пусковой момент), развиваемый устройством, составляет 106,9 Нм, что обеспечивает работу смесителя в пусковом и установившемся режимах.

Вывод

Для повышения эффективности передачи тепла в многосекционном нагревателе необходимо поддерживать температуру пристенного слоя потока нефти на минимальном уровне на входе в каждую последующую нагревательную секцию. Это можно сделать путем перемещения внутреннего, «холодного», слоя в потоке жидкости во внешний, пристенный слой, что приводит к снижению температуры жидкости на входе в очередную нагревательную секцию и, как следствие, к увеличению температурного напора. С этой целью на выходе нагревательной секции устанавливают смеситель специальной конструкции, перемещающий холодную центральную часть потока к стенке нагревателя. Показано, что наиболее эффек-

тивным является использование трехфазного индукционного устройства на базе асинхронного электродвигателя, совмещающего функции привода вращения ротора смесителя и нагревателя. Для повышения коэффициента мощности устройства и улучшения регулировочных свойств смесителя статор трехфазного индуктора встроен в трубопровод. Полученные результаты позволяют выполнить анализ зависимости электромагнитных параметров индуктора – индукции магнитопровода, плотности тока в проводниках, объемной мощности тепловыделения, вращающего момента и других характеристик – от геометрических и электрофизических характеристик системы, вязкости жидкости и частоты и напряжения источника питания. На основании всестороннего анализа полученных зависимостей устанавливается закономерность и степень влияния электрических и геометрических параметров на энергетические характеристики системы. Полученные закономерности далее могут быть использованы при решении задачи выбора оптимальных параметров системы, обеспечивающих требуемые эксплуатационные характеристики в стационарных режимах работы установки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Губин В.Е., Губин В.В. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. М.: Недра, 1982. 296 с.
2. Трубопроводный транспорт нефти: Сб. науч. трудов. Уфа: ВНИИСПТнефть, 1987. 136 с.
3. Тугунов П.И. Нестационарные режимы перекачки нефтей и нефтепродуктов. М.: Недра, 1984. 224 с.
4. Надиров Н.К., Тугунов П.И. Трубопроводный транспорт вязких нефтей. Алма-Ата: Наука, 1985. 146 с.
5. Конесев С.Г., Хлюпин П.А., Садиков М.Р. Анализ эффективности применения нагревательных систем при перекачке вязких нефтей // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. III Всерос. науч.-техн. конф. Уфа: УГНТУ, 2011. С. 211–218.
6. Конесев С.Г., Хлюпин П.А. Экологические нагревательные системы для объектов транспорта и хранения нефти // Безопасность жизнедеятельности, 2012. № 7. С. 35–42.
7. Трофименко К.В., Шишкин Н.Д. Разработка конструкции и оценка параметров индукционного подогревателя нефти и нефтепродуктов // Вестник АГТУ. 2012. № 1 (53). С. 78–83.
8. Шишкин Н.Д. Применение индукционного подогрева нефти при ее транспортировке от месторождений на Северном Каспии // Вестник АГТУ. 2011. № 3. С. 52–56.
9. Струтинский М.Л., Хренков Н.Н., Кувалдин А.Б. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли. М.: Инфра-Инженерия, 2015. 272 с.
10. Данилушкин А.И., Базаров А.А., Зиннатуллин Д.А. Исследование электромагнитных и тепловых полей в установке технологического нагрева нефти // Вестник СамГТУ. Сер.: Технические науки. 2004. Вып. 24. С. 171–173.
11. Данилушкин В.А. Оптимизация конструкции и режимов работы индукционных подогревателей высоковязких нефтей при транспортировке по трубопроводам // Вестник СамГТУ. Технические науки. 2004. Вып. 20. С. 176–179.
12. Базаров А.А. Система индукционного нагрева движущейся жидкости // Вестник СамГТУ. Технические науки, 2005. Вып. 37. С. 12–17.
13. Базаров А.А., Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Васильев И.В. Моделирование электромагнитных процессов в многослойной трехфазной индукционной цилиндрической системе // Вестник СамГТУ. Технические науки. 2017. № 3(55). С. 50–60.
14. Ciofalo M., Brucato A., Grisafi F., Torraca N. Turbulent flow in closed and free surface unbaffled tanks stirred by radial impellers // Chemical Engineering Science. 1996. Vol. 51. P. 3557–3573.
15. Haque J.N., Mahmud T., Roberts K.J., Rhodes D. Modeling turbulent flows with free surface in unbaffled agitated vessels // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2006. Vol. 45. P. 2881–2891.

16. Газизуллин Н.А. Перемешивание вязкой жидкости со свободной поверхностью в аппарате с турбинной мешалкой Рапсона // Вестник СамГТУ. Технические науки. 2014. Вып. 3(42). С. 146–155.
17. Васильцов Э.А., Ушаков В.Г. Аппараты для перемешивания жидких сред. Л.: Машиностроение, 1979. 272 с.
18. Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Максимова М.А., Сурков Д.В. Разработка и исследование трехфазного индукционного устройства для нагрева и перемешивания жидкости // Вестник СамГТУ. Технические науки. 2019. Вып. 3(63). С. 120–132.
19. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. М.: Энергоатомиздат, 1984. 424 с.
20. Башуров Б.П. Судовые насосы и вентиляторы. В/О Мортехреклама, 1983. 32 с.
21. Белоусов А.Н., Мусаткин Н.Ф., Радько В.М. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. Самара: Самарский дом печати, 2003. 336 с.
22. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 5.9. СПб.: Производственный кооператив ТОР, 2009.
23. Карпушкин С.В., Краснянский М.Н., Борисенко А.Б. Расчеты и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов: учеб. пособие. Тамбов: ТГТУ, 2009. 168 с.
24. Юрьев А.С., Пирогов С.Ю., Низовцев В.М., Грачев И.Г., Преснов А.И., Савищенко Н.П., Соколова А.Н. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем. СПб.: АНО НПО «Мир и Семья», 2001. 1154 с.

Статья поступила в редакцию 21 октября 2021 г.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF INDUCTION HEATING SYSTEM IN TECHNOLOGICAL COMPLEXES OF OIL TRANSPORTATION

A.I. Danilushkin, V.A. Danilushkin *

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: aidanilushkin@mail.ru

Abstract. *The problem of development and research of an induction system for heating viscous non-conductive liquids during transportation through pipelines is considered. A specific feature of the research object is the combination of the processes of heating a laminar fluid flow in a cylindrical inductor and mixing in a three-phase inductor - mixer. Research of interrelated electromagnetic, thermal and electromechanical processes in heating and stirring systems has been carried out. The results of a numerical calculation of electromagnetic and thermal fields and the electromagnetic moment of rotation of the rotor in a heated liquid are presented. A relationship has been established between the thermal power released in the elements of the system and the power used to rotate the rotor. The electromechanical (control) characteristics of the induction mixer are given. It is shown that with an appropriate choice of design and operating parameters of the induction system, it is possible to find the required ratio between the thermal power released in the elements of the system and the power used to stir the liquid. The results of the research are intended to solve the problems of designing the design of induction systems for heating viscous liquids and effective control of the heating process.*

Keywords: *induction heating, mathematical model, heat exchange, temperature distribution, pipeline transport, management, energy efficiency.*

REFERENCES

1. *Gubin V.E., Gubin V.V.* Pipeline transport of oil and oil products. M.: Nedra, 1982. 296 pp.
2. Pipeline transport of oil: SB. nauch. trudov. Ufa: VNIIS-Ptneft, 1987. 136 pp.
3. *Tugunov P.I.* Non-Stationary modes of oil and oil products pumping. M.: Nedra, 1984. 224 pp.
4. *Nadirov N.To., Chugunov P.I.* Pipeline transportation of viscous NEF-Tay. Alma-ATA: Nauka, 1985. 146 pp.
5. *Konesev S.G., Khlyupin P.A., Sadikov M.R.* Analysis of the effectiveness of heating systems when pumping viscous oils electric Drive, electrical technologies and electrical equipment of enterprises // SB. nauch. Tr. III All ROS. nauch. – tehn. Conf. (from the international school). Ufa: USNTU, 2011. P. 211–218.
6. *Konesev S.G., Khlyupin P.A.* Environmental heating systems for oil transport and storage facilities // Life safety, 2012. № 7. P. 35–42.
7. *Trofimenko K.V., Shishkin N.D.* Design development and evaluation of parameters of an induction heater for oil and petroleum products // AGTU Bulletin, 2012. № 1(53). P. 78–83.
8. *Shishkin N.D.* Application of induction heating of oil during its transportation from fields in the Northern Caspian // Vestnik AGTU. 2011. № 3. P. 52–56.
9. *Strupinsky M.L., Khrenkov N.N., Kuvaldin A.B.* Design and operation of electric heating systems in the oil and gas industry. M.: Infra-Engineering, 2015. 272 pp.
10. *Danilushkin A.I., Bazarov A.A., Zinnatulin D.A.* Investigation of electromagnetic and thermal fields in the installation of technological heating of oil // Vestnik SamGTU. Technical Sciences, 2004. Vol. 24. P. 171–173.

* *Aleksandr I. Danilushkin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*
Vasiliy A. Danilushkin (PhD (Techn.)), Associate Professor.

11. *Danilushkin V.A.* Optimization of design and operation modes of induction heaters of high-viscosity oils during transportation through pipelines // *Vestnik SamGTU. Technical Sciences*, 2004. № 20. P. 176–179.
12. *Bazarov A.A.* System of induction heating of a moving liquid // *Vestnik SamGTU. Technical Sciences*. 2005. № 37. P. 12–17.
13. *Bazarov A.A., Danilushkin A.I., Danilushkin V.A., Vasiliev I.V.* Modeling of electromagnetic processes in multilayer three-phase induction cylindrical system // *Vestnik SamGTU. Technical Sciences*. 2017. № 3(55). P. 50–60.
14. *Ciofalo M., Brucato A., Grisafi F., Torraca N.* Turbulent flow in closed and free surface unbaffled tanks stirred by radial impellers // *Chemical Engineering Science*, 1996. Vol. 51. P. 3557–3573.
15. *Haque J.N., Mahmud T., Roberts K.J., Rhodes D.* Modeling turbulent flows with free surface in unbaffled agitated vessels // *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2006. Vol. 45. P. 2881–2891.
16. *Gazizullin N.A.* Mixing of a viscous liquid with a free surface in a device with a Rushton turbine agitator // *Vestnik SamGTU. Technical Sciences*, 2014. № 3(42). P. 146–155.
17. *Vasiltsov E.A., Ushakov V.G.* Apparatuses for mixing liquid media. L.: Mashinostroenie, 1979. 272 pp.
18. *Danilushkin A.I., Danilushkin V.A., Maksimova M.A., Surkov D.V.* Development and research of a three-phase induction device for heating and mixing a liquid // *Vestnik SamGTU. Technical Sciences*, 2019. № 3(63). P. 120–132.
19. *Cherkassky V.M.* Pumps, fans, compressors. M.: Energoatomizdat, 1984. 424 pp.
20. *Bashurov B.P.* Ship pumps and fans. I/O Marterella, 1983. 32 pp.
21. *Belousov A.N., Musatkin N.F., Radko V.M.* Theory and calculation of aircraft shovel machines. Samara: Samara house press, 2003. 336 pp.
22. ELCUT. Modeling of two-dimensional fields by finite element method. User manual. Version 5.9. SPb: TOR production cooperative, 2009.
23. *Karpushkin S.V., Krasnyansky M.N., Borisenko A.B.* Calculations and selection of mechanical mixing devices for vertical capacitive apparatuses: textbook. Tambov: TSTU, 2009. 168 pp.
24. *Yuriev A.S., Pirogov S.Yu., Nizovtsev V.M., Grachev I.G., Presnov A.I., Savishchenko N.P., Sokolova A.N.* Reference book on the calculations of hydraulic and ventilation systems. SPb: ANO NPO “Peace and Family”, 2001. 1154 pp.

УДК 621.315

УЧЕТ ПРОВИСАНИЯ ПРОВОДОВ В ПРОЛЕТЕ ВЛ 220 КВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТОКА, НАВЕДЕННОГО В ГРОЗОЗАЩИТНОМ ТРОСЕ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ ТОКОВ ФАЗ

*Е.А. Кротков, Н.В. Безменова, А.А. Щобак**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: krotkov.e.a@gmail.com, saidova_nadezhda@mail.ru, shonSamara@gmail.com

Аннотация. Грозозащитный трос по сравнению с проводами ВЛ 220 кВ наиболее подвержен гололедообразованию. Применяемые в эксплуатации схемы плавки гололеда на грозозащитном тросе, использующие специальный источник электроэнергии, имеют технические ограничения и требуют отключения ВЛ. Альтернативой плавке гололеда является профилактический подогрев грозозащитного троса до положительной температуры индукционным способом от электромагнитных полей проводов ВЛ 220 кВ в рабочем режиме. Приведен краткий обзор индукционных способов подогрева грозозащитного троса ВЛ 220 кВ. Математические модели индукционного подогрева грозозащитного троса не учитывают влияние провисания проводов и грозозащитного троса ВЛ 220 кВ на параметры электромагнитного поля и схемы замещения контура «грозотрос – земля». Поэтому применение на практике индукционного способа подогрева грозозащитного троса на участке ВЛ 220 кВ требует разработки адекватной математической модели. Рассматривается способ индукционного подогрева грозотроса двухцепной ВЛ 220 кВ в специально созданном замкнутом контуре «грозотрос – дополнительный проводник» для предотвращения гололедообразования на нем. Разработана математическая модель для расчета величины тока, индуктированного (наведенного) в контуре «грозозащитный трос – дополнительный проводник» магнитными полями токов ВЛ 220 кВ в рабочем режиме. Приведена оценка влияния провисания проводов и грозозащитного троса двухцепной ВЛ 220 кВ на параметры электромагнитного поля и схемы замещения контура «грозозащитный трос – дополнительный проводник». Применение математической модели позволяет оценить величину наведенного тока для предотвращения гололедообразования на грозозащитном тросе двухцепной ВЛ 220 кВ в рабочем режиме.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, провис провода, грозозащитный трос, гололедно-изморозевые отложения, электромагнитное поле, индуктивное сопротивление замкнутого контура, наведенный ток, профилактический подогрев.

* Евгений Александрович Кротков, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы», кандидат технических наук.

Надежда Валерьевна Безменова, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы», кандидат технических наук.

Александр Андреевич Щобак, аспирант кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».

Основным способом борьбы с гололедообразованием на проводах и грозозащитных тросах является плавка гололеда на отключенной ВЛ 220 кВ. Известно [1], что грозозащитный трос (грозотрос) по сравнению с проводами ВЛ более подвержен гололедообразованию, поэтому в эксплуатации плавка гололеда на грозотросе проводится чаще, чем на проводах ВЛ 220 кВ.

Применяемые на практике схемы плавки гололеда на грозотросе ВЛ основаны на использовании специального источника электроэнергии и имеют технические ограничения [2, 3]. Грозозащитные тросы ВЛ 220 кВ изолированы от земли и имеют класс изоляции более низкий, чем провода ВЛ. Поэтому при подключении источника электроэнергии к грозотросу ВЛ 220 кВ приходится ограничивать длину участков плавки, так как повышение напряжения источника электроэнергии требует усиления изоляции грозотроса и вызывает необходимость увеличения пробивных напряжений искровых промежутков, защищающих эту изоляцию [2]. Это ограничение препятствует плавке гололеда на грозотросе ВЛ 220 кВ непосредственно от источника электроэнергии и побуждает к поиску принципиально других способов.

Альтернативой плавке гололеда является индукционный способ подогрева грозотроса в контуре «грозотрос – земля» до положительной температуры наведенным током от электромагнитных полей проводов ВЛ 110-500 кВ в рабочем режиме [4–8]. Электроэнергия при индукционном способе подогрева грозотроса вводится в контур «грозотрос – земля» не локально (в начале участка контура), как это происходит при непосредственном присоединении источника электроэнергии к грозотросу, а по всей длине участка грозотроса. Это позволяет применять индукционный способ подогрева грозотроса ВЛ 220 кВ, заземленного не только по концам контура, но и внутри контура. Реализация индукционного способа подогрева грозотроса на эксплуатируемой ВЛ 220 кВ заключается: в выборе участка трассы ВЛ с интенсивным гололедообразованием; в создании замкнутого контура с грозотросом для протекания наведенного тока; в выборе электрического режима работы ВЛ (нормальный симметричный, искусственно несимметричный).

Математические модели индукционного способа подогрева грозотроса, рассматриваемые в работах [4–8], основаны на определении параметров схем замещения контуров «провод – грозотрос» и «грозотрос – земля» по формулам J.R. Carson [9, 10]. Недостатком указанных математических моделей является неучёт влияния провисания проводов и грозотроса на параметры электромагнитного поля на промежуточных пролетах ВЛ 220 кВ. Поэтому разработка адекватной математической модели для реализации индукционного способа профилактического подогрева грозотроса на участке ВЛ 220 кВ является актуальным научным исследованием.

В системообразующих электрических сетях, проходящих в гололедоопасном районе 3–4-й категории [11] России, применяются двухцепные ВЛ 220 кВ с промежуточной опорой типа П220-2,4-9,3 [12]. Расположение фазных проводников и грозотроса на опоре П220-2,4-9,3 в декартовой системе координат приведено на рис. 1.

Для предотвращения образования гололеда на двухцепных ВЛ 220 кВ предлагается сформировать замкнутый и заземленный с одной стороны в нормальном режиме контур, состоящий из грозотроса T_1 и изолированного проводника T_2 , проложенного по поверхности земли (рис. 2) [13]. ЭДС, наведенная в контуре T_1-T_2 , является результатом взаимодействия электростатического и электромаг-

нитного поля проводников фаз ВЛ 220 кВ. Величина ЭДС, наведенной электростатическим полем, значительно меньше величины ЭДС, наведенной электромагнитным полем токов фаз ВЛ 220 кВ, поэтому допускается в расчетах ее не учитывать [14].

В реальных условиях провода цепи $A_1B_1C_1(A_2B_2C_2)$ и грозотрос T_1 ВЛ 220 кВ не являются прямолинейными, а провисают под действием собственного веса в промежуточных пролетах линии (рис. 3). Проводник T_2 , расположенный на поверхности земли (в грунте), может считаться прямолинейным.

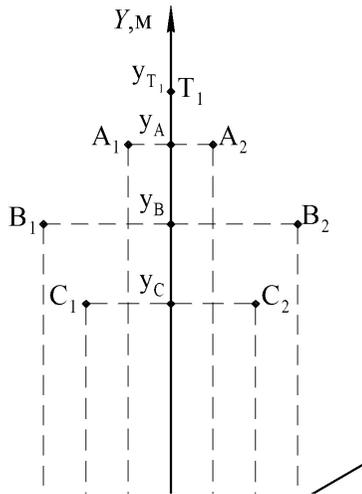


Рис. 1. Схема расположения проводов цепи $A_1B_1C_1(A_2B_2C_2)$ и грозотроса T_1 на опоре П220-2,4-9,3

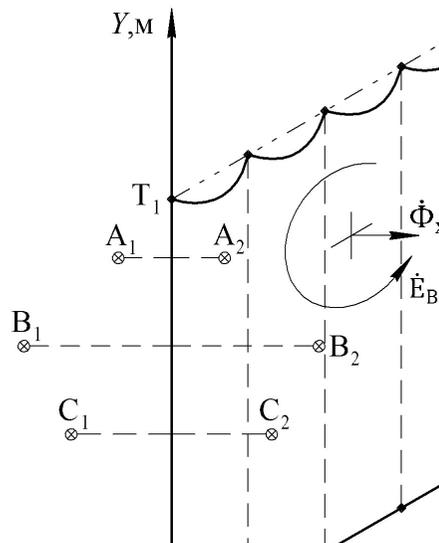


Рис. 2. Схема соединения грозотроса T_1 и проводника T_2 на участке l_k ВЛ 220 кВ

Известно [15, 16], что механическое напряжение в материале провода (грозотроса) в любой точке пролета ВЛ обусловлено только растяжением и направлено по касательной к кривой в рассматриваемой точке. Поэтому в качестве математической модели для анализа провисания проводов и грозозащитных тросов ВЛ высокого напряжения их представляют в виде идеально гибкой однородной нерастяжимой тяжелой нити. Гибкая однородная нерастяжимая тяжелая нить с закрепленными концами в однородном гравитационном поле описывается уравнением цепной линии [16].

В канонической форме уравнение цепной линии пролета ВЛ в декартовой системе координат имеет вид [17]

$$y = h \cdot ch\left(\frac{z}{h}\right) = \frac{h}{2} \left(e^{\frac{z}{h}} + e^{-\frac{z}{h}} \right).$$

В принятой системе координат функция цепной линии каждого провода цепи $A_1B_1C_1 (A_2B_2C_2)$ и грозотроса T_1 ВЛ 220 кВ (рис. 3) примет вид

$$y = h_i \cdot ch\left(\frac{1}{h_i} \left(z - \frac{d}{2} \right)\right), \quad (1)$$

где h_i – минимальная высота каждого провода цепи $A_1B_1C_1 (A_2B_2C_2)$ и грозотроса T_1 в точке $z - \frac{d}{2}$.

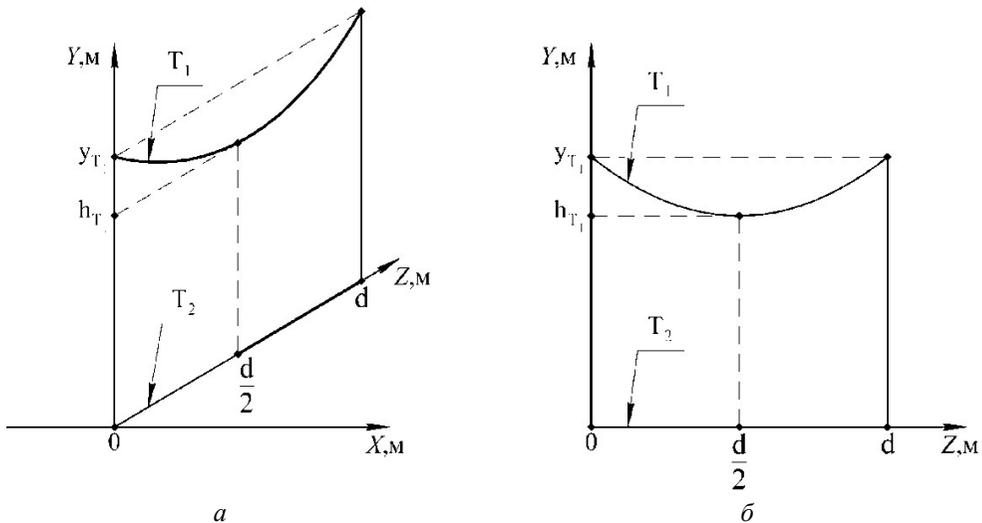


Рис. 3. Кривая провисания грозотроса T_1 в одном пролете ВЛ в пространстве (а) и в плоскости YOZ (б) декартовой системы координат: d – длина пролета; h_{T1} – расстояние от нижней точки грозотроса T_1 до оси OZ ; Y_{T1} – высота точки крепления грозотроса T_1

Вычисление вектора магнитной индукции \vec{B} цепной линии представляет собой частный случай задачи об электромагнитном поле проводящего контура произвольной конфигурации (рис. 4), аналитическое решение которой описывается законом Био – Савара – Лапласа [18]:

$$\vec{B} = \frac{I}{4\pi} \oint_l \frac{[d\vec{l} \cdot \vec{r}]}{r^2}, \quad (2)$$

где $d\vec{l}$ – длина элемента проводника, направление этого вектора совпадает с положительным направлением тока I ; \vec{r} – единичный вектор, направленный из рассматриваемого элемента в точку наблюдения A ; r – расстояние от этого элемента до указанной точки.

Когда проводящий контур имеет сложную конфигурацию, применение выражения (2) для получения аналитического решения связано с известными затруднениями при вычислении интеграла [19]. Эти затруднения заставляют переходить к численным методам нахождения интеграла, основанным на разбиении контура на элементарные отрезки и вычислении создаваемых ими электромагнитных полей, реализованным в специализированном программном обеспечении, например COMSOL Multiphysics [20].

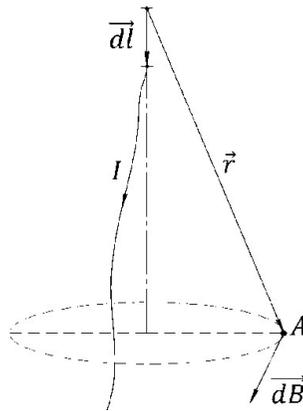


Рис. 4. Иллюстрация применения закона Био – Савара – Лапласа для криволинейного проводника с током

В проекции на плоскость YOZ провода цепи $A_1B_1C_1(A_2B_2C_2)$ и грозотрос T_1 ВЛ 220 кВ отображаются кривыми (рис. 5, а), описываемыми уравнением (1).

Для получения аналитического решения выражения (2), описывающего вектор магнитной индукции поля ВЛ 220 кВ с учетом провисания проводов фаз, перейдем от декартовой системы координат к криволинейной системе координат. Неизвестные криволинейные координаты могут быть получены из набора декартовых координат с помощью преобразования, которое локально обратимо (имеет взаимно-однозначное отображение) в каждой точке пространства. Это означает, что можно преобразовать точку, заданную в декартовой системе координат, в ее криволинейные координаты и обратно [17].

Примем, что в криволинейной системе координат ось OZ отображается в виде кривой, описываемой уравнением:

$$y = -h_i \cdot ch \left(\frac{1}{h_i} \left(z - \frac{d}{2} \right) \right).$$

Тогда в криволинейной системе координат провода цепи $A_1B_1C_1(A_2B_2C_2)$ и грозотрос T_1 в проекции на плоскость YOZ будут отображаться прямолинейными, а проводник T_2 – кривой, описываемой уравнением

$$y = -h_i \cdot ch\left(\frac{1}{h_i}\left(z - \frac{d}{2}\right)\right) - y_{T_1}.$$

Иллюстрация, поясняющая переход от декартовой системы координат к криволинейной, для одного пролета ВЛ длиной d приведена на рис. 5, б.

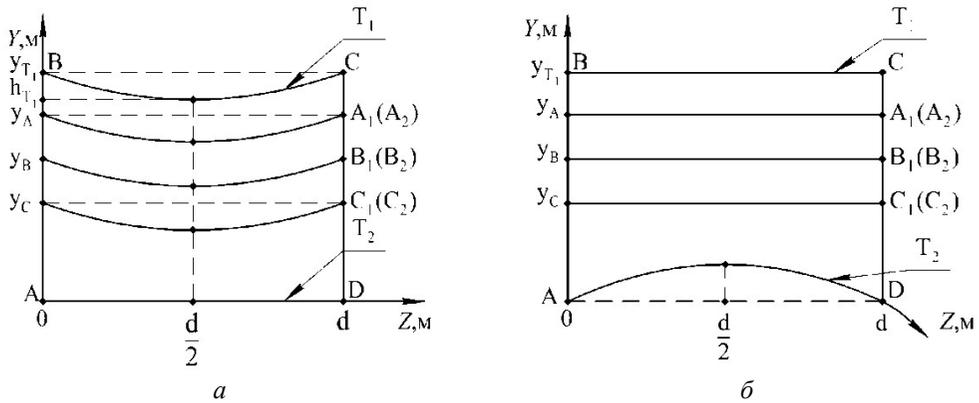


Рис. 5. Проекция проводов цепи $A_1B_1C_1(A_2B_2C_2)$, грозотроса T_1 и проводника T_2 двухцепной ВЛ 220кВ в плоскости YOZ в декартовой (а) и криволинейной (б) системах координат

В криволинейной системе координат каждый провод цепи $A_1B_1C_1(A_2B_2C_2)$ ВЛ 220 кВ представляется в виде длинного прямолинейного проводника с током I , создающего в точке A окружающего пространства свое магнитное поле (рис. 6), вектор магнитной индукции \vec{B} которого определяется по выражению [18, 21]

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r},$$

где $r^2 = (x_c - x)^2 + (y - y_c)^2$.

Из подобия треугольников ABC и ADE получим:

$$\frac{B_x}{B} = \frac{AB}{r} = \frac{y - y_c}{r}, \quad \frac{B_y}{B} = \frac{BC}{r} = \frac{x_c - x}{r}. \quad (3)$$

Составляющие вектора магнитной индукции поля \vec{B} по оси X в точке A , принадлежащей отрезку $[y_{T_1}, y_{T_2}]$ (рис. 2), создаваемые токами цепи $A_1B_1C_1(A_2B_2C_2)$ ВЛ 220 кВ, определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{B}_{xA_1} &= \mu_0 \frac{\dot{I}_A}{2\pi} \cdot \frac{y - y_a}{(a_1 - x)^2 + (y - y_a)^2}; \\ \dot{B}_{xB_1} &= \mu_0 \frac{\dot{I}_B}{2\pi} \cdot \frac{y - y_b}{(b_1 - x)^2 + (y - y_b)^2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{B}_{XB_1} &= \mu_0 \frac{\dot{I}_c}{2\pi} \cdot \frac{y - y_c}{(c_1 - x)^2 + (y - y_c)^2}; \\ \dot{B}_{XA_2} &= \mu_0 \frac{\dot{I}_A}{2\pi} \cdot \frac{y - y_a}{(a_2 - x)^2 + (y - y_a)^2}; \\ \dot{B}_{XB_2} &= \mu_0 \frac{\dot{I}_B}{2\pi} \cdot \frac{y - y_b}{(b_2 - x)^2 + (y - y_b)^2}; \\ \dot{B}_{XB_2} &= \mu_0 \frac{\dot{I}_c}{2\pi} \cdot \frac{y - y_c}{(c_2 - x)^2 + (y - y_c)^2}.\end{aligned}$$

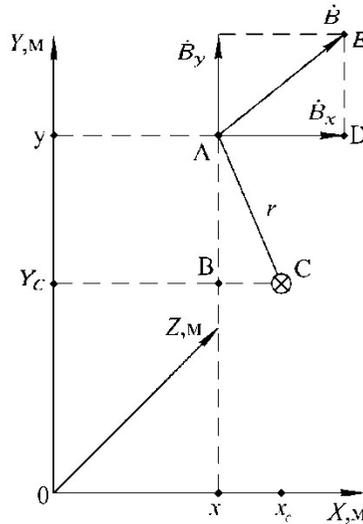


Рис. 6. Вектор магнитной индукции поля \dot{B} в т. A от тока в проводнике C

Вектор магнитной индукции результирующего электромагнитного поля \dot{B}_{XA} в точке A определяется суммой векторов магнитных индукций (принцип суперпозиции), создаваемых током каждого проводника ВЛ 220 кВ в отдельности:

$$\dot{B}_{XA} = \sum_{i=1}^6 \dot{B}_{Xi}.$$

Элементарный магнитный поток $d\dot{\Phi}_X$, проходящий через элементарную поверхность плоскости $ABCD$ площадью $dS = d \cdot dr$, можно определить по формуле:

$$d\dot{\Phi}_X = \dot{B}_{XA} dS.$$

Полный магнитный поток $\dot{\Phi}_{Xd}$, созданный электромагнитными полями токов каждой фазы двухцепной ВЛ 220 кВ и пронизывающий перпендикулярно плоскость контура $T_1 - T_2$ длиной d (рис. 2), определяется выражением

$$\dot{\Phi}_{Xd} = \dot{\Phi}_{XABCD} - \dot{\Phi}_{XT_2},$$

$$\dot{\Phi}_{XABCD} = \int_0^{y_{T_1}} \dot{B}_{XA} \int_0^d dz dy = d \int_0^{y_{T_1}} \dot{B}_{XA} dy ,$$

$$\dot{\Phi}_{XT_2} = \int_0^d \int_0^{y_{T_2}(z)} \dot{B}_{XA} dz dy .$$

С учетом выражения (3) в замкнутом контуре $T_1 - T_2$ длиной d наводится ЭДС \dot{E}_d :

$$\dot{E}_d = -\frac{d\dot{\Phi}_{Xd}}{dt} = -j\omega \left(d \int_0^{y_{T_1}} \dot{B}_{XA} dy - \int_0^d \int_0^{y_{T_2}(z)} \dot{B}_{XA} dz dy \right) .$$

ЭДС \dot{E}_k , наведенная в замкнутом контуре $T_1 - T_2$ длиной \dot{E}_k , состоящем из n промежуточных пролетов ВЛ 220 кВ, определится по выражению

$$\dot{E}_k = n\dot{E}_d .$$

Для нахождения индуктивного сопротивления \dot{X}_k замкнутого плоского контура $T_1 - T_2$, приведенного на рис. 2, определим его собственную индуктивность L по выражению [22, 23]

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2S}{l} - 0,15 \right) - G ,$$

где l – периметр контура; S – площадь контура; G – индуктивность провода круглого сечения при частоте 50 Гц, при которой ток распределен равномерно по сечению провода, определяется выражением

$$G = \frac{\mu_0 l}{2\pi} (\ln r - 0,25) ,$$

где r – радиус проводника T_1, T_2 .

С учетом (19) выражение для определения L примет вид:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2S}{l} + 0,1 \right) .$$

Площадь контура S (рис. 2) определяется по выражению

$$S = y_{T_1} l_k - n S_{ABCD} ,$$

в котором площадь S_{ABCD} криволинейной трапеции $ABCD$ (рис. 5, а) вычисляется по формуле

$$S_{ABCD} = h_{T_1} l_{BC} = 2h_{T_1}^2 \operatorname{sh} \frac{d}{2h_{T_1}} ,$$

где l_{BC} – длина дуги BC (рис. 5, а) определяется выражением

$$l_{BC} = 2h_{T_1} \operatorname{sh} \frac{d}{2h_{T_1}} .$$

Периметр контура l (рис. 2) определяется выражением

$$l = 2y_{T_1} + l_k + n l_{BC} .$$

Активное сопротивление проводника грозотроса T_1 с учетом его провисания на участке длиной l_k , состоящем из n промежуточных пролетов ВЛ 220 кВ:

$$R_{T_1} = r_0 n l_{BC},$$

где r_0 – погонное активное сопротивление грозотроса, Ом/км.

Ток \dot{I}_k , протекающий в замкнутой электрической цепи контура $T_1 - T_2$ (рис. 2), определяется по выражению

$$\dot{I}_k = \frac{\dot{E}_k}{R_{T_1} + R_{T_2} + jX_k}.$$

Значение тока \dot{I}_k возможно увеличить компенсацией индуктивности контура X_k , достигаемой включением в цепь контура емкости C , величина которой определяется из условия создания резонанса напряжения.

Выводы

Разработана математическая модель для определения параметров электромагнитного поля и схемы замещения «грозотрос – дополнительный проводник» с учетом провисания проводов и грозотроса в промежуточном пролете двухцепной ВЛ 220 кВ. Применение математической модели позволяет определить величину наведенного тока для последующей оценки возможности предотвращения гололедообразования на грозозащитном тросе двухцепной ВЛ 220 кВ в рабочем режиме.

Для повышения эффективности индукционного способа подогрева грозотроса на двухцепной ВЛ 220 кВ целесообразно компенсировать индуктивность контура «грозотрос – дополнительный проводник» включением в цепь контура конденсаторной установки, величина емкости которой определяется из условия создания резонанса напряжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреевский В.Н. Эксплуатация воздушных линий электропередачи. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1976. 616 с.
2. Левченко И.И., Засыпкин А.С., Аллилуев А.А., Сацук Е.И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах: Учеб. пособие. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2006. 494 с.
3. Masoud Farzaneh. Atmospheric Icing of Power Networks // Springer Science Business Media B.V., 2008. 388 p.
4. Шовкопляс С.С. Плавка гололеда на заземленном грозозащитном тросе индуктированным током от наложенного реактивного тока в фазных проводах // Изв. вузов. Электромеханика. Спецвыпуск «Диагностика энергооборудования». 2008. С. 23–24.
5. Шовкопляс С.С. Плавка гололеда на грозозащитных тросах индуктированным током повышенной частоты // Изв. вузов. Электромеханика. Спецвыпуск «Электроснабжение». 2010. С. 17–18.
6. Бальбердин Л.Л., Галанов В.И., Крайчик Ю.С., Краснова Б.П., Лозинова Н.Г., Мазуров М.И. Индукционная плавка гололеда на грозозащитных тросах воздушных линий электропередачи // Электрические станции. 2002. № 1. С. 31–37.
7. Шовкопляс С.С. Способ предотвращения гололедообразования на грозозащитных тросах воздушной линии электропередачи сверхвысокого напряжения наведенными токами без вывода ее из работы // Энергетик. 2018. № 8. С. 13–20.
8. Засыпкин А.С., Засыпкин А.С. (мл.). Профилактический обогрев грозозащитных тросов воздушных линий наведенным током // Изв. вузов. Электромеханика. 2018. Т. 61. № 2. С. 99–106.
9. Carson J.R. Wave propagation in over head wires with ground return // The Bell System Technical Journal, 1926. Vol. 5, No. 4. P. 539–554.
10. Хаяси С. Волны в линиях электропередачи. М.: Госэнергоиздат, 1960. 343 с.

11. СТО 56947007-29.240.01.189-2014. Методические указания по применению альбомов карт климатического районирования территории по субъектам РФ. ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС». Приказ ОАО «ФСК ЕЭС» от 03.10.2014. № 444. 95 с.
12. СТО 56947007-29.240.55.255-2018. Стальные решетчатые опоры новой унификации ВЛ 220 кВ. Указания по применению опор новой унификации при проектировании ВЛ 220 кВ. Филиал АО «НТЦ ФСК ЕЭС». СибНИИЭ. 2018. 323 с.
13. *Дмитриев М.В., Родчихин С.В.* Грозозащитные тросы ВЛ 35-750 кВ. Выбор мест заземления // *Новости электротехники*. 2017. № 2(104). С. 2–5.
14. *Мисриханов М.Ш., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю.* Обеспечение электромагнитной безопасности электросетевых объектов: монография. 2-е изд. М., Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 508 с.
15. *Меркин Д.Р.* Введение в механику гибкой нити. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 240 с.
16. *Бошнякович А.Д.* Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП. Л.: Энергия, 1975. 248 с.
17. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1974. 832 с.
18. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Учеб. пособие для студентов вузов в 3 т. 2-е изд., перераб. Т. 2. М.: Наука, 1982. 273 с.
19. *Краснитский Ю.А.* Магнитное поле цепной линии на низких частотах // *Transport and Telecommunication*. 2003. Vol. 4, No 1. С. 9–15.
20. COMSOL Multiphysics. Платформа для создания расчетных моделей и приложений. [Электронный ресурс] [2022]. <https://www.comsol.ru> (дата обращения 11.01.2022).
21. *Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники: в 3 т. Учебник для вузов. Т. 3. Теория электромагнитного поля. СПб.: Питер, 2003. 377 с.
22. *Цейтлин Л.А.* Индуктивности проводов и контуров. Л.: Госэнергоиздат, 1950. 229 с.
23. *Цицикян Г.Н., Баранов Ю.Д.* Сопоставительный анализ выражений по расчету индуктивностей прямоугольных проводов и контуров // *Электричество*. 2018. № 2. С. 59–63.

Статья поступила в редакцию 5 октября 2021 г.

ACCOUNTING FOR WIRE SAGGINGTON SPAN OF 220 KV OHL WHEN DETERMINING CURRENT, INDUCED IN GROUND WIRE BY PHASE CURRENT MAGNETIC FIELDS

*E.A. Krotkov, N.V. Bezmenova, A.A. Shchobak**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: krotkov.e.a@gmail.com, saidova_nadezhda@mail.ru, shonSamara@gmail.com

Abstract. Overhead ground-wire cable (GW) is more prone to ice formation compared to 220 kV overhead lines. Ice-melting methods for GW using special power source have certain engineering constraints and required is connection of overhead line. Preventive heating of GW to above-zero temperature is an equivalent method to ice-melting. Preventive heating shall be provided by induction from electromagnetic field (EMF) of 220 kV overhead lines while in service. Induction methods of 220 kV OHL GW heating have been summarized and briefly described. Mathematical models of GW inductive heating do not consider the influence of wire and GW sagging on EMF parameters and equivalent circuit "ground wire-earth". Therefore, sufficient mathematical model is required to use induction method of GW heating at 220 kV OHL segment. We propose induction heating for GW of double-circuit 220 kV OHL inclosed circuit "ground wire-additional conductor" top revertence formation. Mathematical model have been developed to calculate current, induced in circuit "ground wire-additional conductor" by magnetic fields of 220 kV OHL current while in service. Influence of wire and GW sagging on EMF parameters and equivalent circuit "ground wire-additional conductor" has been estimated. Due to mathematical model we could estimate induced current to prevent ice formation on GW of double-circuit 220 kV OHL while in service. Closed circuit "ground wire-additional conductor" is recommended for practical use, with capacitor loop included into circuit, its capacitance to be determined based on voltage resonance conditions.

Keywords: overhead line, wire sagging, ground wire, glaze-ice and rime deposition, electromagnetic field, inductive resistance of closed circuit, induced current, preventive heating.

REFERENCES

1. *Andrievskij V.N.* Eksploataciya vozdušnyh linij elektroperedachi. M.: Energiya, 1976. 616 pp.
2. *Levchenko I.I., Zasyplin A.S., Alliluev A.A., Sacuk E.I.* Diagnostika, rekonstrukciya ieksploataciya vozdušnyh linij elektroperedachi v golodnyh rajonah. Novočerkassk: YURGTU, 2006. 494 pp.
3. *Masoud Farzaneh.* Atmospheric Icing of Power Networks // Springer Science Business Media B.V. 2008. 388 p.
4. *Šovkoplyas S.S.* Ice melting on a grounded lightning protection cable by induced current from superimposed reactive current in phase conductors // *Izv. vuzov. Elektromekhanika. Specvypusk «Diagnostika energooborudovaniya».* 2008. P. 23–24.
5. *Šovkoplyas S.S.* Ice melting on ground wires by induced high frequency current // *Izv. vuzov. Elektromekhanika. Specvypusk «Elektrosnabzhenie».* 2010. P. 17–18.
6. *Balyberdin L.L., Galanov V.I., Krajchik YU.S., Krasnova B.P., Lozinova N.G., Mazurov M.I.* Induction melting of ice on lightning protection cables of overhead power lines // *Elektricheskie stancii.* 2002. No 1. P. 31–37.

* *Evgenij A. Krotkov (PhD (Tech.)), Associate Professor.*
Nadezhda V. Bezmenova (PhD (Tech.)), Associate Professor.
Aleksandr A. Shchobak, Postgraduate Student

7. *Shovkoplyas S.S.* A method for preventing icing on lightning protection cables of an overhead power transmission line of ultra-high voltage by induced currents without taking it out of operation // *Energetik*. 2018. No 8. P. 13–20.
8. *Zasyplin A.S., Zasyplin A.S. (jr.)*. Preventive heating of lightning protection cables of overhead lines by induced current // *Izv. vuzov. Elektromekhanika*. 2018. Vol. 61, no 2. P. 99–106.
9. *Carson J.R.* Wave propagation in over head wires with round return // *The Bell System Technical Journal*, 1926. Vol. 5, No. 4. P. 539–554.
10. *Hayasi S.* Volny v liniyah elektroperedachi. M.: Gosenergoizdat, 1960, 343 pp.
11. STO 56947007-29.240.01.189-2014. Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu al'bomov kart klimaticheskogo rajonirovaniya territorii po subektam RF. OAO «NTC FSK EES». Prikaz OAO «FSK EES» ot 03.10.2014. No 444. 95 pp.
12. STO 56947007-29.240.55.255-2018. Stal'nye reshetchatye opory novoj unifikacii VL 220 kV. Ukazaniya po primeneniyu opornovoj unifikacii pri proektirovanii VL 220 kV. Filial AO «NTC FSK EES» – SibNII. 2018. 323 pp.
13. *Dmitriev M.V., Rodchihin S.V.* Lightning protection cables VL 35-750 kV. Choice of grounding locations // *Novosti Elektrotehniki*. 2017. No 2(104). P. 2–5.
14. *Misrihanov M.Sh., Rubcova N.B., Tokarskij A.Yu.* Obespechenie elektromagnitnoj bezopasnosti elektrosetevyh obektov. M., Vologda: Infra-Inzheneriya, 2019. 508 pp.
15. *Merkin D.R.* Vvedenie v mekhaniku gibkoj niti. M.: Nauka, 1980. 240 pp.
16. *Boshnyakovich A.D.* Raschet provodov podstanciji bolshih perekhodov LEP. L.: Energiya, 1975. 248 pp.
17. *Korn G., Korn T.* Spravochnik po matematike (dlya nauchnyh rabotnikov I inzhenerov). M.: Nauka, 1974. 832 pp.
18. *Savel'ev I.V.* Kurs obshchej fiziki. Ucheb. Posobie dlya studentov vtuzov v 3-h t. 2-e izd., pererab. Vol 2. M.: Nauka, 1982. 273 pp.
19. *Krasnitskij Yu.A.* Catenary magnetic field at low frequencies // *Transport and Telecommunication*. 2003. Vol. 4, no 1. P. 9–15.
20. COMSOL Multiphysics – Platform for creation of computational models and applications. <https://www.comsol.ru> (accessed Januar11, 2022).
21. *Demirchyan K.S., Nejman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L.* Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Vol. 3. Teoriya elektromagnitnogo polya. Sankt-Peterburg: Piter, 2003. 377 pp.
22. *Cejtlin L.A.* Induktivnosti provodov i konturov. L.: Gosenergoizdat. 1950. 229 pp.
23. *Cicikyan G.N., Baranov Yu.D.* Comparative analysis of expressions for calculating the inductances of rectangular wires and circuits // *Elektrichestvo*. 2018. No 2. P. 59–63.

УДК 621.314.25

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ВИТКОВ И СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ КАТУШЕК ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ ТРЕХФАЗНО-МНОГОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧИСЛА ФАЗ

*Ю.В. Москалев**

Омский государственный университет путей сообщения
Россия, 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

E-mail: yuriyvm@mail.ru

Аннотация. В статье перечислены различные технические устройства и системы, для работы которых необходимы трансформаторные преобразователи числа фаз. Увеличение числа фаз позволяет существенно улучшить показатели и характеристики таких устройств и систем. Разработан подход для определения минимального количества витков катушек вторичной обмотки трехфазно-многофазного трансформаторного преобразователя, каждая фаза вторичной обмотки которого состоит из трех последовательно соединенных между собой катушек, размещенных по одной на каждом из трех стержней сердечника. Количество витков можно рассчитать для вторичной обмотки, число фаз которой больше двух. Рассмотрен пример для определения количества витков катушек вторичной обмотки трехфазно-пятифазного трансформаторного преобразователя. Приведена схема соединения вторичной обмотки такого устройства, выполнен расчет полной мощности катушек вторичной обмотки для заданной многофазной нагрузки, соединенной в многолучевую звезду. Составлена имитационная модель трехфазно-пятифазного преобразователя в среде моделирования Matlab Simulink. Необходимая схема соединения обмоток реализована с использованием однофазных трансформаторов с различными коэффициентами трансформации. В качестве выходных данных модели получена симметричная пятифазная система напряжений. Предложен коэффициент, который позволяет оценить количество витков, необходимых для формирования одной фазы вторичной обмотки преобразователя. С использованием этого коэффициента выполнено сравнение количества витков катушек вторичной обмотки устройств с различным числом фаз.

Ключевые слова: преобразователь числа фаз, трансформатор, оптимизация, схема соединения, число витков.

Среди существующих преобразователей числа фаз на практике часто находят применение трансформаторные преобразователи числа фаз (ТПФ) благодаря их простоте и надежности [1–7].

Такие преобразователи нужны для работы различных технических устройств и систем.

1. Преобразовательная техника (выпрямители и инверторы). Как известно, увеличение количества фаз позволяет улучшить качество выпрямленного напря-

* Москалев Юрий Владимирович, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», кандидат технических наук, доцент.

жения и первичного тока преобразователя [8–14], упростить схемы цепей, выравнивающих напряжения и токи при групповом соединении полупроводниковых вентилях.

2. Многофазные системы электропередачи. Многофазные линии электропередачи имеют ряд преимуществ по сравнению с трехфазными: увеличение пропускной способности при одинаковом напряжении и сечении проводов, уменьшение электромагнитных полей [15–17] и др.

3. Системы электроснабжения и устройства с несимметричной нагрузкой. Для подключения к трехфазной электрической сети общего назначения несимметричных нагрузок используют специальные трансформаторы, например для питания системы тягового электроснабжения железных дорог или подключения к трехфазной сети мощных электрических печей [18–20].

В настоящее время разработано большое количество ТПФ, которые имеют различные конфигурации магнитной системы и схемы соединения обмоток [2–7, 9, 11, 14]. Обмотки ТПФ необходимо соединять в сложные схемы, часто катушки обмоток содержат одну или несколько отпаяк, которые также должны быть соединены с другими обмотками и их отпайками, что значительно усложняет сборку, диагностику и ремонт трансформатора [6, 9, 11, 14].

Рассмотрим трехфазно-многофазный ТПФ со схемами соединения первичной и вторичной обмоток (рис. 1).

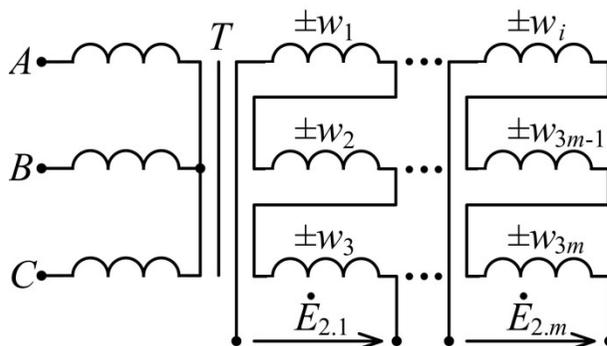


Рис. 1. Схема соединения обмоток трехфазно-многофазного ТПФ

Активная часть ТПФ состоит из трехстержневого магнитопровода с симметричной трехфазной первичной и многофазной вторичной обмотками. Каждая фаза вторичной обмотки состоит из трех последовательно соединенных между собой катушек, размещенных по одной на каждом из трех стержней сердечника.

Геометрическая сумма ЭДС катушек позволяет получить любую необходимую начальную фазу вектора ЭДС фазной обмотки. Для того чтобы обеспечить многофазную симметричную систему ЭДС на выводах вторичной обмотки ТПФ, нужно определить число витков катушек каждой фазы (W), при этом суммарная мощность симметричной многофазной нагрузки должна быть равномерно распределена между катушками, размещенными на трех разных стержнях сердечника, чтобы нагрузка трехфазной сети была симметричной.

При решении задачи приняты следующие допущения: ТПФ идеальный, преобразователь подключен к сети с симметричным трехфазным напряжением.

Расчеты витков катушек вторичной обмотки выполним в относительных единицах:

$$w_i = \frac{W_i}{W_2}, \quad (1)$$

где W_2 – число витков катушки вторичной обмотки для обеспечения на ее выводах трансформаторной ЭДС E_2 ; i – номер фазы вторичной обмотки ($1 \leq i \leq m$); m – количество фаз вторичной обмотки ($m \geq 3$).

Многофазная симметричная система ЭДС будет обеспечена при выполнении условий:

$$\dot{E}_{2,i} = E_{3i-2} + E_{3i-1}a^2 + E_{3i}a = E_2 \exp\left(-j \frac{2\pi}{m}(i-1)\right), \quad (2)$$

где a – комплексный оператор ($a = -0,5 + 0,866j$).

С учетом (1) систему уравнений (2) можно записать:

$$w_{3i-2} + a^2 w_{3i-1} + a w_{3i} = \exp\left(-j \frac{2\pi}{m}(i-1)\right). \quad (3)$$

Далее запишем уравнения системы (3) отдельно для действительной и мнимой части комплексных чисел:

$$\begin{cases} w_{3i-2} - \frac{1}{2} w_{3i-1} - \frac{1}{2} w_{3i} = \cos\left(-\frac{2\pi}{m}(i-1)\right); \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} w_{3i-1} + \frac{\sqrt{3}}{2} w_{3i} = \sin\left(-\frac{2\pi}{m}(i-1)\right). \end{cases} \quad (4)$$

Система уравнений (4) является недоопределенной, т. е. количество уравнений системы (4) равно $2m$, число неизвестных $3m$. В результате анализа рангов основной и расширенной матриц этой системы было определено, что система совместна и имеет множество решений.

Для определения минимального числа витков катушек вторичной обмотки необходимо решить оптимизационную задачу с использованием следующей целевой функции:

$$F = \sum_{i=1}^{3m} |w_i| \rightarrow \min. \quad (5)$$

При решении оптимизационной задачи с использованием критерия (5) и ограничений (4) для различных значений числа фаз вторичной обмотки определены оптимальные значения количества витков катушек.

Выполнен расчет полной мощности катушек при подключении к выводам вторичной обмотки симметричной многофазной нагрузки. В результате расчета установлено, что суммарные мощности катушек вторичной обмотки, которые размещены на разных стержнях сердечника, не равны между собой.

В табл. 1 приведены значения количества витков катушек в относительных единицах и значения полной мощности каждой катушки при $m = 5$, полная мощность рассчитана при фазных ЭДС многофазной вторичной обмотки, равной $E_2 = 1$ В, и проводимости каждой фазы многофазной нагрузки, соединенной в многолучевую звезду, равной $(1-j)$ См.

Как можно видеть в табл. 1, полные мощности катушек, размещенных на разных стержнях сердечника, не равны между собой, поэтому условий (4), которые позволяют обеспечить симметричную многофазную ЭДС, недостаточно для решения задачи.

**Количество витков и полная мощность катушек
вторичной обмотки ТПФ с учетом ограничений (4)**

$3i-2$	w_{3i-2} , о.е.	S_{3i-2} , ВА	$3i-1$	w_{3i-1} , о.е.	S_{3i-1} , ВА	$3i$	w_{3i} , о.е.	S_{3i} , ВА
1	1,00	$1,00 + j 1,00$	2	0,00	$0,00 + j 0,00$	3	0,00	$0,00 + j 0,00$
4	0,00	$0,00 + j 0,00$	5	0,24	$0,34 - j 0,02$	6	-0,86	$0,66 + j 1,02$
7	-0,47	$0,66 + j 0,10$	8	0,68	$0,34 + j 0,90$	9	0,00	$0,00 + j 0,00$
10	-0,47	$0,10 + j 0,66$	11	0,00	$0,00 + j 0,00$	12	0,68	$0,90 + j 0,34$
13	0,00	$0,00 + j 0,00$	14	-0,86	$1,02 + j 0,66$	15	0,24	$-0,02 + j 0,34$
ΣS_1 , ВА		$1,76 + j 1,76$	ΣS_2 , ВА		$1,70 + j 1,54$	ΣS_3 , ВА		$1,54 + j 1,70$

Суммарная полная мощность катушек вторичной обмотки, размещенных на трех стержнях сердечника, при симметричной многофазной нагрузке:

$$\dot{S}_1 = \sum_{i=1}^m \left[E_2 E_{3i-2} Y \exp \left(j \left(\frac{2\pi}{m} (i-1) - \psi \right) \right) \right] = \frac{m}{3} E_2^2 Y \exp(-j\psi); \quad (6)$$

$$\dot{S}_2 = \sum_{i=1}^m \left[E_2 a^2 E_{3i-1} Y \exp \left(j \left(\frac{2\pi}{m} (i-1) - \psi \right) \right) \right] = \frac{m}{3} E_2^2 Y \exp(-j\psi); \quad (7)$$

$$\dot{S}_3 = \sum_{i=1}^m \left[E_2 a E_{3i} Y \exp \left(j \left(\frac{2\pi}{m} (i-1) - \psi \right) \right) \right] = \frac{m}{3} E_2^2 Y \exp(-j\psi), \quad (8)$$

где $Y \exp(j\psi)$ – комплексное значение проводимости фазы нагрузки, соединенной в многолучевую звезду, См.

Уравнения (6)–(8) можно преобразовать следующим образом:

$$\sum_{i=1}^m \left[E_{3i-2} \exp \left(j \frac{2\pi}{m} (i-1) \right) \right] = \frac{m}{3} E_2; \quad (9)$$

$$a^2 \sum_{i=1}^m \left[E_{3i-1} \exp \left(j \frac{2\pi}{m} (i-1) \right) \right] = \frac{m}{3} E_2; \quad (10)$$

$$a \sum_{i=1}^m \left[E_{3i} \exp \left(j \frac{2\pi}{m} (i-1) \right) \right] = \frac{m}{3} E_2. \quad (11)$$

Уравнения (9)–(11) также можно преобразовать, разделив обе части этих уравнений на величину действующего значения фазной ЭДС E_2 , и записать отдельно для действительной и мнимой части комплексного числа:

$$\sum_{i=1}^m \left[w_{3i-2} \cos \left(\frac{2\pi}{m} (i-1) \right) \right] = \frac{m}{3}; \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^m \left[w_{3i-2} \sin \left(\frac{2\pi}{m} (i-1) \right) \right] = 0; \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^m \left[w_{3i-1} \cos \left(\frac{2\pi}{m} (i-1) \right) \right] = -\frac{m}{6}; \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^m \left[w_{3i-1} \sin \left(\frac{2\pi}{m} (i-1) \right) \right] = \frac{\sqrt{3}m}{6}; \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^m \left[w_{3i} \cos \left(\frac{2\pi}{m} (i-1) \right) \right] = -\frac{m}{6}; \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^m \left[w_{3i} \sin \left(\frac{2\pi}{m} (i-1) \right) \right] = -\frac{\sqrt{3}m}{6}. \quad (17)$$

С учетом выражений (4) уравнения (12)–(17) являются линейно зависимыми, поэтому для ограничения, при котором обеспечиваются одинаковые суммарные мощности катушек на каждом стержне сердечника, достаточно использовать только два уравнения, например (12) и (13).

Таким образом, для определения количества витков и способа соединения катушек вторичной обмотки преобразователя фаз (см. рис. 1) необходимо решить оптимизационную задачу с критерием (5) и ограничениями:

$$\begin{cases} w_{3i-2} - \frac{1}{2} w_{3i-1} - \frac{1}{2} w_{3i} = \cos \left(-\frac{2\pi}{m} (i-1) \right); \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} w_{3i-1} + \frac{\sqrt{3}}{2} w_{3i} = \sin \left(-\frac{2\pi}{m} (i-1) \right); \\ \sum_{i=1}^m \left[w_{3i-2} \cos \left(\frac{2\pi}{m} (i-1) \right) \right] = \frac{m}{3}; \\ \sum_{i=1}^m \left[w_{3i-2} \sin \left(\frac{2\pi}{m} (i-1) \right) \right] = 0; \\ w_i \in R; \quad i = \overline{1, m}; \quad m \geq 3. \end{cases} \quad (18)$$

Решение оптимизационной задачи можно выполнить с использованием, например, численного метода внутренней точки для любого заданного значения числа фаз $m \geq 3$ [21, 22]. Также можно перейти от задачи условной оптимизации к безусловной, для этого необходимо учитывать ограничения в виде алгебраических выражений и определить независимые переменные с использованием методов безусловной оптимизации [21, 22].

В качестве примера определим число витков и схему соединения вторичной обмотки ТПФ с пятифазной вторичной обмоткой ($m = 5$).

При $m = 5$ система линейных алгебраических уравнений, которые устанавливают ограничения (18), состоит из 12 уравнений и 15 неизвестных переменных. В этом случае можно ограничения записать в виде математических выражений (табл. 2), устанавливающих связь между тремя переменными, которые могут быть заданы произвольно, и остальными переменными системы уравнений.

Таблица 2

Математические выражения для учета ограничений при $m = 5$

i	w_i	i	w_i	i	w_i
1	$+0,635 + w_9 + 0,618w_{12} - 0,618w_{15}$	6	$-1,518 - 0,618w_9 + 0,618w_{12} + w_{15}$	11	$-0,679 + w_{12}$
2	$-0,365 + w_9 + 0,618w_{12} - 0,618w_{15}$	7	$-0,47 + w_9$	12	w_{12}
3	$-0,365 + w_9 + 0,618w_{12} - 0,618w_{15}$	8	$0,679 + w_9$	13	$-0,24 + w_{15}$
4	$-0,66 - 0,618w_9 + 0,618w_{12} + w_{15}$	9	w_9	14	$-1,098 + w_{15}$
5	$-0,42 - 0,618w_9 + 0,618w_{12} + w_{15}$	10	$-1,149 + w_{12}$	15	w_{15}

Таким образом, для трехфазно-пятифазного ТПФ в критерий (5) входят пятнадцать слагаемых. В этом случае независимыми будут три переменные w_9, w_{12}, w_{15} . В результате решения задачи методом безусловной оптимизации определены оптимальные значения количества витков вторичной обмотки трансформатора: $w_9 = 0,000$; $w_{12} = 0,679$; $w_{15} = 0,240$.

В табл. 3 приведены значения количества витков катушек в относительных единицах и значения полной мощности каждой катушки, рассчитанные с учетом обеспечения одинаковой суммарной полной мощности катушек, размещенных на каждом из трех стержней сердечника преобразователя.

Таблица 3

Количество витков и полная мощность катушек вторичной обмотки ТПФ с учетом ограничений (18)

$3i-2$	w_{3i-2} , о.е.	S_{3i-2} , ВА	$3i-1$	w_{3i-1} , о.е.	S_{3i-1} , ВА	$3i$	w_{3i} , о.е.	S_{3i} , ВА
1	0,907	$0,91 + j0,91$	2	-0,093	$-0,03 + j0,13$	3	-0,093	$0,13 - j0,03$
4	0,000	$0,00 + j0,00$	5	0,240	$0,34 - j0,02$	6	-0,858	$0,66 + j1,02$
7	-0,469	$0,66 + j0,10$	8	0,679	$0,34 + j0,90$	9	0,000	$0,00 + j0,00$
10	-0,469	$0,10 + j0,66$	11	0,000	$0,00 + j0,00$	12	0,679	$0,90 + j0,34$
13	0,000	$0,00 + j0,00$	14	-0,858	$1,02 + j0,66$	15	0,240	$-0,02 + j0,34$
ΣS_1 , ВА		$1,67 + j1,67$	ΣS_2 , ВА		$1,67 + j1,67$	ΣS_3 , ВА		$1,67 + j1,67$

Полная мощность пятифазной нагрузки с одинаковыми проводимостями $(1-j)$ См и $E_2 = 1$ В равна $(5 + j5)$ ВА; мощность катушек вторичной обмотки, размещенных на каждом из трех стержней сердечника, $(1,67 + j1,67)$ ВА.

На рис. 2 приведена схема соединения вторичной обмотки трехфазно-пятифазного ТПФ с рассчитанными значениями витков вторичной обмотки в относительных единицах.

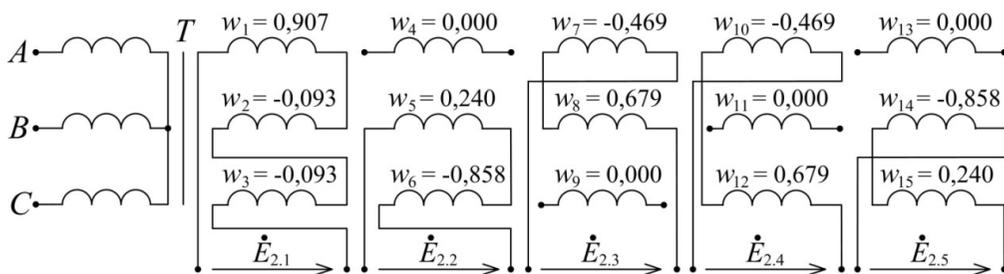


Рис. 2. Схема соединения вторичной обмотки трехфазно-пятифазного ТПФ

При последовательном соединении катушек фазных обмоток необходимо учитывать положительный или отрицательный знак перед значением числа витков соответствующей катушки. Если катушки вторичной обмотки выполнены с одинаковым направлением намотки, то для обеспечения необходимых фазных ЭДС катушки должны быть соединены в различные схемы, например на рис. 2 для $m = 5$.

Для создания на выводах вторичной обмотки ТПФ симметричной пятифазной системы ЭДС с действующим значением 220 В необходимо обеспечить сле-

дующие значения ЭДС катушек: $E_i = \{199,6; 20,4; 20,4; 0; 52,8; 188,8; 103,3; 149,3; 0; 103,3; 0; 149,3; 0; 188,8; 52,8\}$ В.

Выполним расчет потребляемой катушками вторичной обмотки ТПФ мощности для активно-индуктивной симметричной пятифазной нагрузки с проводимостью фаз $(0,01 - j0,01)$ См.

В табл. 4 приведены значения активной и реактивной мощности, потребляемой (генерируемой) каждой катушкой вторичной обмотки ТПФ.

Таблица 4

Активная и реактивная мощность катушек пятифазной вторичной обмотки ТПФ при фазной ЭДС 220 В и проводимостях фаз $(0,01 - j0,01)$ См

$3i-2$	P_{3i-2} , Вт	Q_{3i-2} , вар	$3i-1$	P_{3i-1} , Вт	Q_{3i-1} , вар	$3i$	P_{3i} , Вт	Q_{3i} , вар
1	438,86	438,86	2	-16,52	61,66	3	61,66	-16,52
4	0,00	0,00	5	164,10	-8,60	6	319,90	492,60
7	317,51	50,29	8	166,49	433,71	9	0,00	0,00
10	50,29	317,51	11	0,00	0,00	12	433,71	166,49
13	0,00	0,00	14	492,60	319,90	15	-8,60	164,10
Σ	806,7	806,7	Σ	806,7	806,7	Σ	806,7	806,7

Активные и реактивные мощности вторичных обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода каждой из трех фаз ТПФ, равны между собой (см. табл. 4). Каждая фаза первичной обмотки потребляет из трехфазной сети одинаковые мощности, поэтому преобразователь является симметричной нагрузкой для трехфазной сети.

Моделирование преобразователя с заданной схемой соединения обмоток (см. рис. 2) выполнено в программе *Matlab Simulink*. Схема соединения обмоток трехфазно-пятифазного ТПФ реализована с использованием однофазных трансформаторов, у которых заданы различные коэффициенты трансформации (рис. 3).

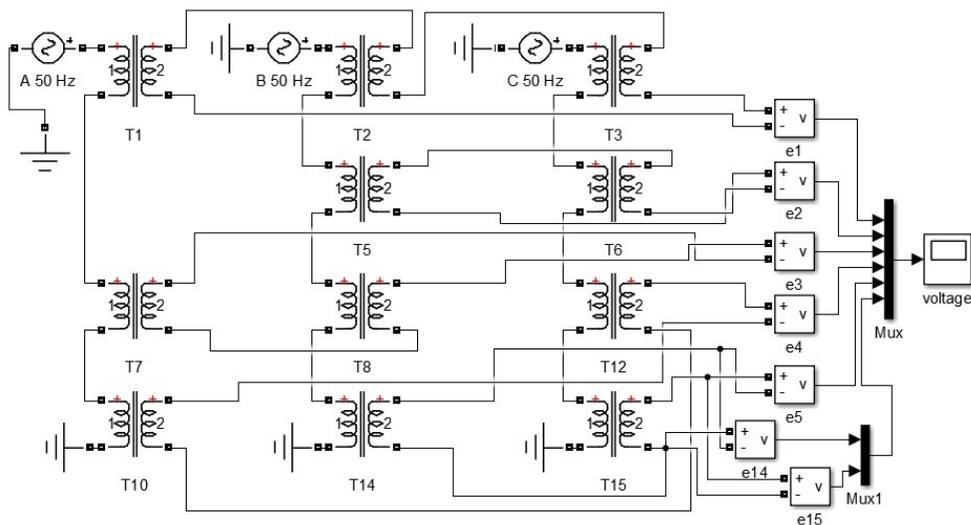


Рис. 3. Моделирование трехфазно-пятифазного ТПФ в *Matlab Simulink* с использованием однофазных трансформаторов

В результате моделирования ТПФ в качестве выходных данных (блок *voltage*) получена симметричная пятифазная система ЭДС (рис. 4).

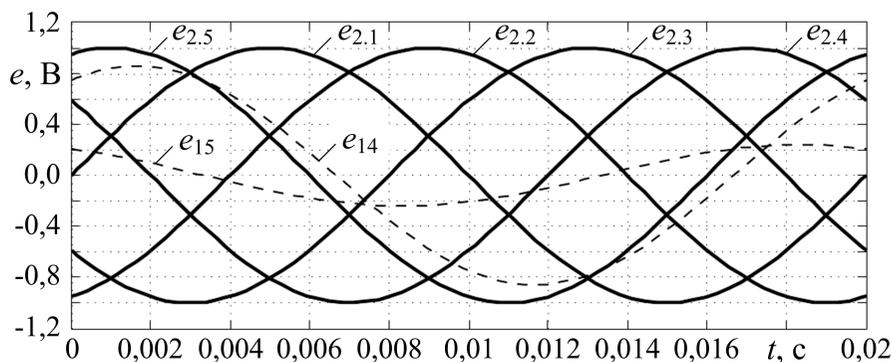


Рис. 4. Временные диаграммы ЭДС вторичной обмотки трехфазно-пятифазного ТПФ

На рис. 4 также приведены временные диаграммы ЭДС катушек e_{14} и e_{15} , обеспечивающие создание ЭДС пятой фазы вторичной обмотки $e_{2.5}$.

Для сравнения количества витков, которое требуется для формирования одной фазы вторичной обмотки ТПФ с различным числом фаз, можно использовать следующий показатель:

$$k_m = \frac{\sum_{i=1}^{3m} |w_i|}{m}. \quad (19)$$

Коэффициент k_m показывает, во сколько раз в среднем нужно больше витков для формирования одной фазы вторичной обмотки ТПФ (см. рис. 1) по сравнению с числом витков катушки, размещенной на одном стержне сердечника трансформатора, при одинаковых фазных ЭДС.

На рис. 5 приведены значения коэффициента k_m , рассчитанные для различного числа фаз вторичной обмотки рассматриваемого преобразователя.

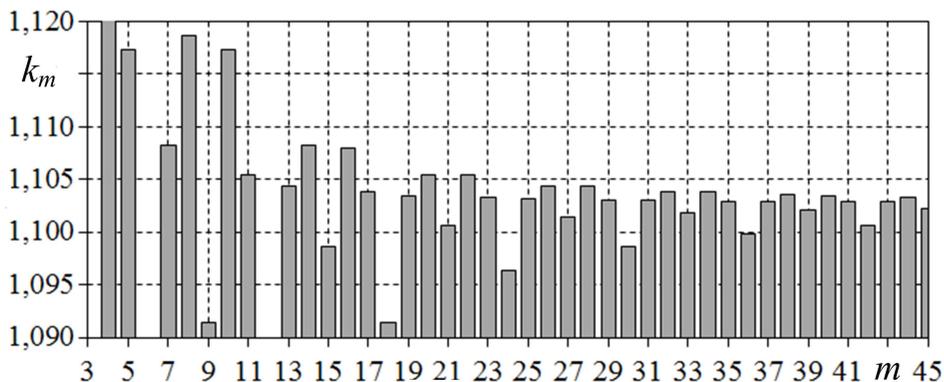


Рис. 5. Коэффициент k_m для разных значений числа фаз вторичной обмотки ТПФ

При $m = 3$ и 6 коэффициент k_m равен единице. Для $m = 3$ ТПФ соответствует обычному трехфазному двухобмоточному трансформатору. Если $m = 6$, то на каждом стержне сердечника размещено по две катушки с одинаковым количеством витков. ЭДС катушек, размещенных на одном стержне, будут в противофазе, что позволяет сформировать две фазы из шести. В результате шесть катушек реализуют шестифазную вторичную обмотку ТПФ.

Наибольшее значение, равное 1,244, рассматриваемый коэффициент принимает для четырехфазной вторичной обмотки. Для $m = 12$ коэффициент k_m равен 1,077, в этом случае у ТПФ в среднем на одну фазу вторичной обмотки нужно больше на 7,7 % витков, чем на фазу трехфазного двухобмоточного трансформатора.

Коэффициент k_m рассчитан для числа фаз в диапазоне от 3 до 300, значения для $3 \leq m \leq 45$ приведены на рис. 5, при $m > 45$ наибольшее значение коэффициента составило 1,106 ($m = 110$ и 193), наименьшее – 1,1.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Разработан подход для определения минимального количества витков катушек вторичной обмотки трехфазно-многофазного ТПФ, каждая фаза вторичной обмотки которого состоит из трех последовательно соединенных между собой катушек, размещенных по одной на каждом из трех стержней сердечника. Количество витков можно рассчитать для вторичной обмотки, число фаз которой больше двух.

2. Рассмотрен пример для определения количества витков катушек вторичной обмотки трехфазно-пятифазного ТПФ, приведена схема соединения вторичной обмотки такого устройства, выполнен расчет полной мощности катушек вторичной обмотки для заданной многофазной нагрузки, соединенной в многолучевую звезду.

3. Составлена имитационная модель трехфазно-пятифазного ТПФ в среде моделирования *Matlab Simulink*, необходимая схема соединения обмоток реализована с использованием однофазных трансформаторов с различными коэффициентами трансформации, в качестве выходных данных модели получена симметричная пятифазная система напряжений.

4. Рассчитаны значения коэффициента, с использованием которого выполнено сравнение необходимого числа витков для формирования одной фазы вторичной обмотки трехфазно-многофазного ТПФ. Если число фаз вторичной обмотки находится в диапазоне от 17 до 300, то в среднем на одну фазу вторичной обмотки нужно на 10,6 % больше витков, чем у трехфазного двухобмоточного трансформатора с одинаковыми значениями фазных ЭДС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Копылов И. П.* Электрические машины. М.: Юрайт, 2014. 675 с.
2. *Hughes A., Drury B.* Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. Burlington: Newnes, 2013. 440 p.
3. *Prakash S., Kalpana R., Singh B., Bhuvaneswari G.* A 20-Pulse Asymmetric Multiphase Staggering Autoconfigured Transformer For Power Quality Improvement // IEEE Transactions on Power Electronics. 2018. Vol. 33. Issue 2. P. 917–925.
4. *Singh A., Marti J., Srivastava K.* Circuit Reduction Techniques in Multiphase Modelling of Power Transformers // IEEE Transactions on Power Delivery. 2010. Vol. 25. Issue 3. P. 1573–1579.
5. *Yusoff N., Karim K., Ghani S., Sutikno T., Jidin A.* Multiphase Transformer Modelling using Finite Element Method // International Journal of Power Electronics and Drive System. 2015. Vol. 6. No. 1. P. 56–64.

6. Пат. RU(11) 2526093 (13) С1 МПК H02M 5/14. Двенадцатифазный понижающий авто-трансформаторный преобразователь числа фаз / *С.Н. Григорьев, В.А. Сучков, В.В. Филатов, М.В. Чумаева, Ю.И. Солуянов*. № 2013103393/07; Заявлено 25.01.2013; Оpubл. 20.08.2014. Бюл. № 23.
7. *Karekar S.* Modeling and Simulation of Three Phases to Seven Phases Transformer Connection // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2016. Vol. 4. No. 3. P. 273–280.
8. *Зиновьев Г. С.* Силовая электроника. М.: Юрайт, 2015. 667 с.
9. *Щуров Н.И., Мятёж С.В.* Синтез и анализ многофазных вентильных преобразователей: Монография. Новосибирск: НГТУ, 2020. 202 с.
10. *Евдокимов С.А., Щуров Н.И.* Структурный синтез многофазных вентильных преобразователей: Монография. Новосибирск: НГТУ, 2010. 424 с.
11. *Рогинская Л. Э., Ялалова З. И.* Определение электромагнитной мощности фазообразующих трансформаторов преобразовательных установок // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. № 2. Т. 9. С. 18–23.
12. *Мятёж С.В., Ворфоломеев Г.Н., Евдокимов С.А., Щуров Н.И.* Расчет установленных мощностей обмоток трансформаторных преобразователей числа фаз для многопульсных выпрямителей // Электротехника. 2005. № 4. С. 28–36.
13. Пат. RU(11) 33277 (13) U1 МПК H02M 7/08. Источник постоянного напряжения с 24-кратной частотой пульсации / *С.А. Евдокимов, Г.Н. Ворфоломеев, Н.И. Щуров, С.В. Мятёж*. № 2003115510/20; Заявлено 27.05.2003; Оpubл. 10.10.2003. Бюл. № 28.
14. *Paice D.* Nine-Phase Step-Up/Step-Down Autotransformer. Patent US, no. 7274280 B1, 2007.
15. *Закарюкин В.П., Крюков А.В.* Моделирование многофазных линий электропередачи: Монография. Иркутск: ИрГУПС, 2014. 168 с.
16. *Guangye L., Yihan Y.* Three-phase-to-four-phase transformer for four-phase power-transmission systems // IEEE Transactions on Power Delivery. 2002. Vol. 17. P. 1018–1022.
17. *Гершенгорн А.И.* Многофазные линии электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения // Электрические станции. 1994. № 8. С. 67–70.
18. *Бурков А.Т.* Электроника и преобразовательная техника. Т. 2. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. 307 с.
19. *Kharlamov V.V., Moskalev Y.V., Lysenko V.S.* Connection Three-Phase Winding of the Induction Motor to a Single-Phase Electrical Network. IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), November 2018.
20. *Ronsin F.* Transformateur diphasé-triphase. Patent RF, no. 2648612, 1990.
21. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1980. 976 с.
22. *Borne P., Popescu D., Filip F., Stefanoiu D.* Optimization in Engineering Sciences. London: Wiley, 2013. 307 p.

Статья поступила в редакцию 4 декабря 2021 г.

DETERMINATION OF THE NUMBER OF PHASES AND COILS SCHEME CONNECTION OF THE SECONDARY WINDING OF A THREE-PHASE-MULTIPHASE PHASES NUMBER TRANSFORMER CONVERTER

*Yu. V. Moskslev**

Omsk State Transport University
35, Marx av., Omsk, 644046, Russian Federation

E-mail: yuriyvm@mail.ru

Abstract. The article lists various technical devices and systems that require transformer converters of the number of phases. Increasing the number of phases can significantly improve the performance and characteristics of such devices and systems. An approach has been developed to determine the minimum coils number of the secondary winding of a three-phase-multiphase transformer converter, each phase of the secondary winding of which consists of three coils connected in series, one placed on each of the three core rods. The number of turns can be calculated for the secondary winding, the number of phases of which is more than two. An example is considered for determining the number of turns of the coils of the secondary winding of a three-phase-five-phase transformer converter. The diagram of the connection of the secondary winding of such a device is given, the calculation of the total power of the coils of the secondary winding for a given multiphase load connected as a multipath star is performed. A simulation model of a three-phase-five-phase converter has been compiled in the Matlab Simulink simulation environment. The necessary circuit for connecting the windings is implemented using single-phase transformers with different transformation coefficients. Symmetrical five-phase voltage system is obtained as the output data of the model. For a different number of phases of the secondary winding, the values of the coefficient are calculated, which allows us to estimate the number of turns required to form one phase of the secondary winding of the converter. Using this coefficient, the comparison of the number of turns of the coils of the secondary winding of the device with a different number of phases was performed.

Keywords: phase number converter, transformer, optimization, connection diagram, number of turns.

REFERENCES

1. Kopylov I.P. Elektricheskie mashiny. M.: Yurajt, 2014. 675 p.
2. Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. Burlington: Newnes, 2013. – 440 p.
3. Prakash S., Kalpana R., Singh B., Bhuvanewari G. A 20-Pulse Asymmetric Multiphase Staggering Autoconfigured Transformer For Power Quality Improvement // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018. Vol. 33. Issue 2. P. 917–925.
4. Singh A., Marti J., Srivastava K. Circuit Reduction Techniques in Multiphase Modelling of Power Transformers // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010. Vol. 25. Issue 3. P. 1573–1579.
5. Yusoff N., Karim K., Ghani S., Sutikno T., Jidin A. Multiphase Transformer Modelling using Finite Element Method // *International Journal of Power Electronics and Drive System*. 2015. Vol. 6. No. 1. P. 56–64.
6. Grigorev S.N., Suchkov V.A., Filatov V.V., Chumaeva M.V., Soluyanov Y.I. Dvenadcatifaznyj ponizhayushchij avtotransformatornyj preobrazovatel chisla faz. Patent RF, no. 2526093, 2014.

* Yuriy V. Moskalev PhD (Techn.), Associate Professor.

7. Karekar S. Modeling and Simulation of Three Phases to Seven Phases Transformer Connection // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2016. Vol. 4. No. 3. P. 273–280.
8. Zinoviev G.S. Silovaya elektronika. M.: Yurajt, 2015. 667 p.
9. Shchurov N.I., Myatezh S.V. Sintez i analiz mnogofaznyh ventil'nyh preobrazovatelej. Novosibirsk: NSTU, 2020. 202 p.
10. Evdokimov S.A., Shchurov N.I. Strukturnyj sintez mnogofaznyh ventil'nyh preobrazovatelej. Novosibirsk: NSTU, 2010. 424 p.
11. Roginskaya L.E., Yalalova Z.I. Determination of electromagnetic power of phase-transforming transformers of conversion devices // *Electrical and data processing facilities and systems*. 2013. no. 2. Issue 9. P. 18–23.
12. Myatezh S.V., Vorfolomeev G.N., Evdokimov S.A., Shchurov N.I. Calculation of installed capacities of findings of transformer converters of the number of phases for multi-pulse rectifiers // *Russian Electrical Engineering*. 2005. no. 4. P. 28–36.
13. Evdokimov S.A., Vorfolomeev G.N., Shchurov N.I., Myatezh S.V. Istochnik postoyannogo napryazheniya s dvadcati chetyrekhkratnoj chastotoj pul'sacii. Patent RF, no. 33277, 2003.
14. Paice D. Nine-Phase Step-Up/Step-Down Autotransformer. Patent US, no. 7274280 B1, 2007.
15. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modelirovanie mnogofaznyh linij elektroperedachi. Irkutsk: IrGUPS, 2014. 168 p.
16. Guangye L., Yihan Y. Three-phase-to-four-phase transformer for four-phase power-transmission systems // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2002. Vol. 17. P. 1018–1022.
17. Gershengorn A.I. Multiphase power transmission lines of high and ultrahigh voltage // *Electrical stations*. 1994. no. 8. P. 67–70.
18. Burkov A.T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika. T. 2. M.: FGBOU «Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport», 2015. 307 p.
19. Kharlamov V.V., Moskalev Y.V., Lysenko V.S. Connection Three-Phase Winding of the Induction Motor to a Single-Phase Electrical Network. *IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, November 2018.
20. Ronsin F. Transformateur diphas-triphase. Patent RF, no. 2648612, 1990.
21. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchihsya vtuzov. M.: Science, 1980. 976 p.
22. Borne P., Popescu D., Filip F., Stefanoiu D. Optimization in Engineering Sciences. London: Wiley, 2013. 307 p.

УДК 620.424.1

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕТИ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА НА РАБОТУ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ НА ЗЕМЛЮ

*М.О. Скрипачев, А.С. Ведерников**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: michael-ss@yandex.ru

Аннотация. Система постоянного оперативного тока представляет совокупность электротехнических приборов и устройств, включающих источники энергии, необходимые для функционирования основных технологических комплексов предприятий. Особенности систем постоянного тока являются значительная пространственная распределенность, подверженность сильным электромагнитным наводкам и помехам. Частой неисправностью в системах постоянного оперативного тока, изолированных от земли, является повреждение изоляции одного полюса на землю. Данная неисправность не сопровождается большими токами, однако может вызвать ложную работу электротехнического комплекса. В данной работе рассматривается метод поиска поврежденного участка, проводится анализ возникновения помех в работе системы поиска. Усовершенствованная система поиска, основанная на методе наложения внешнего опорного напряжения, подтвердила свою работоспособность в реальных объектах.

Ключевые слова: система постоянного оперативного тока, система контроля изоляции, щит постоянного тока, наложение внешнего опорного напряжения.

Введение

Используемая в электротехнических комплексах система постоянного тока представляет собой систему двух изолированных друг от друга и относительно земли проводников. Проводники имеют разность потенциалов, которую определяет номинальное напряжение. Это устройство носит название «щит постоянного тока» (ЩПТ). Также в состав ЩПТ входят стандартные ячейки, жесткая ошиновка, коммутационная и защитная аппаратура. Главным достоинством системы постоянного тока является высокая надежность источников питания [1, 2]. Стандартами определены напряжения питания ЩПТ 24, 48, 110, 220 В. Наибольшее распространение получило оперативное напряжение 220 В.

От щита отходят присоединения, от которых питаются устройства релейной защиты, автоматики, привода выключателей [3]. Эти цепи имеют значительную протяженность и разветвленность. Вероятность снижения сопротивления изоляции на землю одного из полюсов достаточно высока [4]. Под термином «полюс»

* Михаил Олегович Скрипачев, старший преподаватель кафедры «Электрические станции».

Александр Сергеевич Ведерников, заведующий кафедрой «Электрические станции», декан электротехнического факультета, кандидат технических наук, доцент.

понимается один из изолированных относительно земли проводников, имеющих связь через коммутационный аппарат с полюсом аккумуляторной батареи.

В последнее время получила развитие альтернативная энергетика. Так, расположенные на большой территории солнечные элементы вырабатывают электроэнергию на постоянном токе, связываясь с энергосистемой через инверторы [5]. Вероятность понижения изоляции на землю в разветвленной сети постоянного тока, соединяющей инверторы с солнечными элементами, возрастает под воздействием атмосферных условий.

Согласно требованиям ПТЭ для оперативных цепей 220 В сопротивление изоляции не должно быть ниже 20 кОм на полюс. При снижении ниже 20 кОм оперативный персонал обязан как можно скорее обнаружить место снижения изоляции и устранить неисправность. При этом производство других работ, кроме поиска места повреждения, запрещается.

Пути совершенствования системы контроля изоляции

Помочь персоналу в поиске повреждения может описанная авторами система пофидерного контроля сопротивления изоляции, работающая по методу наложения внешнего опорного напряжения. Достоинством данного метода, в отличие от метода с использованием системных параметров ЩПТ [6, 7], является независимость работы системы контроля изоляции от системных параметров ЩПТ. Описываются достоинства комбинации методов использования системных параметров с методами наложения [8, 9].

Применение метода наложения к ЩПТ подробно описано авторами в трудах [10, 11]. Особенностью применения является наложение внешнего опорного сигнала через емкостную развилку, состоящую из двух конденсаторов. Контроль переменной составляющей потенциала шин осуществлен также через емкостную развилку. В работах показано, что применение емкостной развилки в качестве инжекционной и измерительной имеет ряд преимуществ по сравнению [12] с резистивными развилками – отсутствие тепловыделения на элементах схемы.

Схема ЩПТ с подключением цепей наложения приведена на рис. 1.

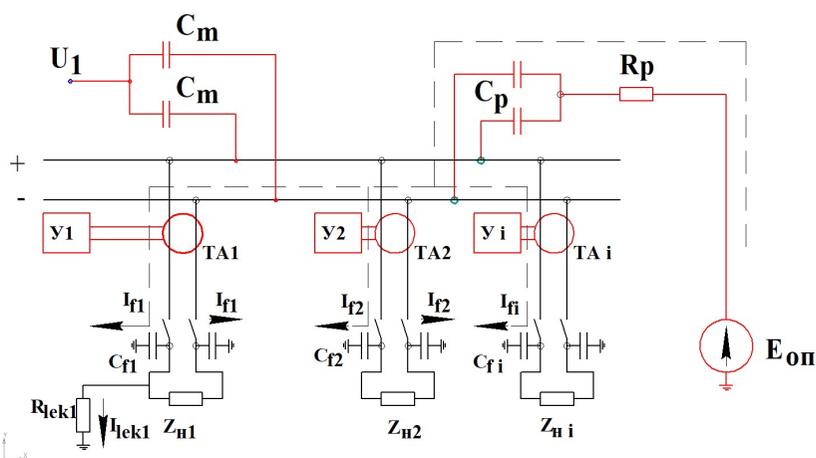


Рис. 1. Схема наложения опорного сигнала на сеть постоянного тока

В основу работы системы положено выделение активной составляющей тока $i_{Fi}(t)$ (рис. 1), контролируемого на данном интервале времени фидера относи-

тельно переменной составляющей напряжения шин относительно земли $u_1(t)$. Эта величина вытекает из скалярного произведения векторов [13] $u_1(t)$ и $i_{f_1}(t)$, отнесенного к конечному интервалу наблюдения, и описывается выражением

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) i_{f_1}(t) dt, \quad (1)$$

где T – интервал времени наблюдения, кратный периоду опорного сигнала.

Частота опорного сигнала принята 20 Гц. Максимальное значение амплитуды синусоидального напряжения шин, определяемое работой источника опорного сигнала, – 20 В. Эти значения величин не будут создавать помех в сети постоянного тока, способных вызвать ложную работу цифровых и электромеханических реле и устройств автоматики.

Величина P_s пропорциональна активной мощности, создаваемой током $i_{f_1}(t)$ относительно напряжения $u_1(t)$. Если контролируемый фидер не имеет повреждения изоляции на землю, то значение интеграла в выражении (1) будет близко нулю и ток $i_{f_1}(t)$ будет носить емкостной характер, сопротивление утечки велико. Состояние изоляции контролируемого участка соответствует норме. Под сопротивлением утечки понимаем образование паразитной цепи из активного сопротивления между полюсом ЩПТ и землей с любой причиной происхождения [8]. В случае появления повреждения величина P_s будет больше нуля. Величина P_s в случае постоянства $u_1(t)$ будет являться функцией от сопротивления утечки R_{lek} . Но при работе системы контроля изоляции возможно изменение схемы щита – например вывод присоединений в ремонт. В результате значение величины P_s в выражении (1) будет изменяться вследствие изменения амплитуды $u_1(t)$.

Чтобы избежать влияния системных параметров, в работах [7] показано, что сопротивление изоляции на землю R_{lek} определяется выражением

$$R_{lek} = \frac{\int_0^T u_1^2(t) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) i_{f_1}(t) dt}. \quad (2)$$

Числитель выражения (2) представляет квадрат нормы [13] переменной составляющей напряжения шин щита относительно земли. Отношение нормы сигнала напряжения $u_1(t)$ к скалярному произведению $u_1(t) \cdot i_{f_1}(t)$ является сопротивлением утечки в зоне контролируемого фидера и не зависит от системных параметров сети постоянного тока.

Разработанное авторами устройство производит замеры и фильтрацию величин $i_{f_1}(t)$, $u_1(t)$ инжектируемого в сеть постоянного тока $i_1(t)$, предназначенных для определения сопротивления утечки в зоне контролируемого фидера. Устройство содержит аналоговый тракт, состоящий из трех независимых каналов (рис. 2), и цифровой модуль, управляющий каналом обработки сигнала тока $i_{f_1}(t)$ и производящий вычисления в соответствии с выражением (2). При произ-

водстве вычислений интегралы в числителе и знаменателе заменены интегральными суммами.

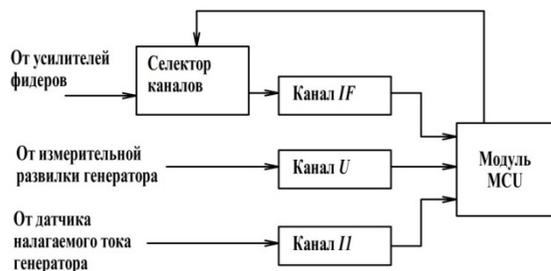


Рис 2. Структурная схема устройства контроля изоляции на землю щита оперативного постоянного тока

Модуль MCU (рис. 2) осуществляет переключение внешних усилителей таким образом, что подключенным в любой момент может быть только один. Внешние усилители выполняются в виде отдельных устройств по числу контролируемых фидеров. Каждое такое устройство содержит электромагнитный датчик тока и электронный модуль.

Электромагнитная часть непосредственно контролирует переменную составляющую тока фидера, изготавливается разъемной [14]. Сконструированный авторами датчик описан в работе [15]. Датчик тока обязательно выполняется компенсационного типа [16].

Конструктивно датчик тока представляет собой два ферритовых полукольца, на которые намотаны сфазированные между собой рабочие полуобмотки $W_{21\text{раб}}$ и $W_{22\text{раб}}$ (рис. 3), формирующие ЭДС $e_{21(t)}$ и $e_{22(t)}$.

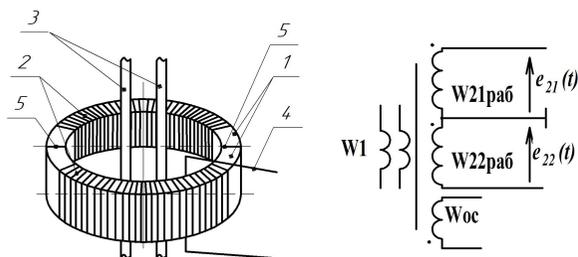


Рис. 3. Конструкция электромагнитной части датчика тока системы контроля изоляции на землю: 1 – разъемный магнитопровод; 2 – рабочие полуобмотки; 3 – проводники первичной обмотки; 4 – компенсационная обмотка; 5 – стык магнитопроводов

Сигналы с полуобмоток подаются на вход измерительного усилителя на ОУ [17].

Выход усилителя подключен через емкость к низкоомному входу преобразователя ток – напряжение. Выход внешнего усилителя – токовый для уменьшения

влияния наводимых помех и уменьшения влияния длины соединительного кабеля с основным устройством.

Передаточная функция датчика тока описывается выражением:

$$T(s) = \frac{0.338s}{1.58 \cdot 10^{-5} s^2 + 6.75 \cdot 10^{-3} s + 1}. \quad (3)$$

Датчик тока представляет собой звено второго порядка.

Сигнал с токового выхода внешнего усилителя подается на селектор каналов (рис. 2), далее проходит через тракт канала тока фидера ИФ, после чего поступает на вход АЦП, входящий в состав цифрового модуля.

Канал ИФ (рис. 2) имеет следующую структурную схему (рис. 4).

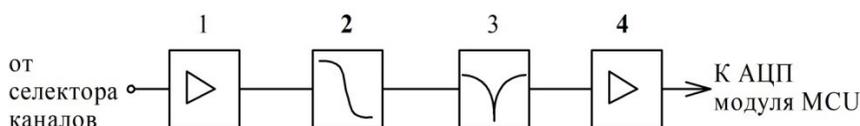


Рис. 4. Структурная схема канала тока: 1 – входной усилитель; 2 – фильтр низких частот; 3 – режекторный фильтр; 4 – выходной буферный каскад

Канал тока фидера ИФ выполняет функции неселективной фильтрации сигнала с датчика тока. Фильтр 2-го порядка 2 (рис. 4) имеет частоту среза 25 Гц. Передаточная функция фильтра нижних частот 2 (рис. 4) имеет описание [17, 18]:

$$T_{LP}(s) = \frac{K_{U0} w_{LP} s}{s^2 + \frac{w_{LP}}{Q_{LP}} s + w_{LP}^2}, \quad (4)$$

где K_{U0} – коэффициент усиления в полосе пропускания; w_{LP} – частота среза; Q_{LP} – добротность фильтра, характеризующая крутизну АЧХ в полосе задержки.

Подставляя значения для $K_{U0}=1, w_{LP}=157\text{c}^{-1}, Q_{LP}=1$, получим выражение

$$T_{LP}(s) = \frac{1}{4.05 \cdot 10^{-5} s^2 + 6.36 \cdot 10^{-3} s + 1}. \quad (5)$$

Режекторный фильтр 3 имеет центральную частоту подавления 50 Гц. Описывается режекторный фильтр [17] выражением

$$T_{BS}(s) = \frac{K_{PJ} (s^2 + w_{FJ}^2)}{s^2 + \frac{w_{FJ}}{Q_{FJ}} s + w_{FJ}^2}, \quad (6)$$

где K_{PJ} – коэффициент усиления в полосах пропускания; w_{FJ} – центральная частота полосы подавления. Для частоты 50 Гц она равна 314c^{-1} .

Подставив в выражение (6) значения, получим описание режекторного фильтра:

$$T_{BS}(s) = \frac{1.01 \cdot 10^{-5} s + 1}{1.01 \cdot 10^{-5} s^2 + 9.58 \cdot 10^{-3} s + 1}. \quad (7)$$

У соединенных каскадно звеньев 2 и 3 (рис. 4) в соответствии с выражениями (5) и (7) имеем:

$$W_{IF}(s) = \frac{1.02 \cdot 10^{-5} s^2 + 1}{4.54 \cdot 10^{-7} s^3 + 1.18 \cdot 10^{-4} s^2 + 1.59 \cdot 10^{-2} s + 1}. \quad (8)$$

Выражение (8) представляет передаточную функцию канала тока фидера ИФ. Полином знаменателя ограничен третьей степенью ввиду пренебрежимо малого коэффициента при s^4 . Несложно подсчитать, что нулем функции (8) будет значение $s = j314$.

Назначение канала тока фидера – подавление помех и согласование уровня сигнала частотой 20 Гц до уровня, необходимого для цифровой обработки.

Канал U контроля переменной составляющей потенциала шин имеет сходную структуру с каналом ИФ тока контролируемого фидера (рис. 4). Отличием являются наличие в канале каскада фазового фильтра первого порядка, включенного между режекторным фильтром 3 и буферным каскадом 4.

Канал контроля налагаемого тока ИИ (рис. 2) служит для обеспечения работоспособности устройства контроля изоляции при металлических замыканиях на землю одного полюса в цепях щита постоянного тока. В этом случае числитель и знаменатель выражения (2) могут принять нулевые значения, что создаст неопределенность.

Для устранения неопределенности цифровая часть системы вычисляет скалярное произведение векторов тока контролируемого фидера $i_F(t)$ и потребляемого от опорного генератора тока $i_1(t)$.

В сигнале на выходе датчика тока будет составляющая, обусловленная не только опорным сигналом, сигналом помех промышленной частоты 50 Гц, но и составляющими 300 Гц. Она вызвана неравными емкостями относительно земли у полюсов контролируемого фидера. Схему питания ЩПТ совместно со схемой наложения опорного сигнала, вытекающую из схемы на рис. 1, рассмотрим в виде, представленном на рис. 5.

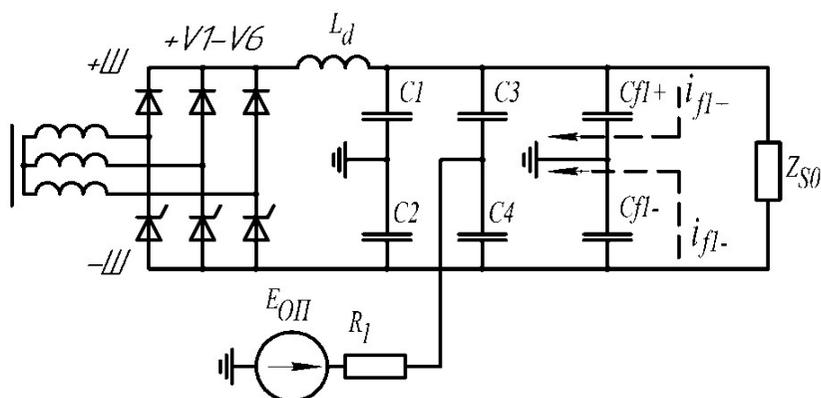


Рис. 5. Схема наложения контрольного опорного напряжения совместно с работой ВА3П

Емкости $C1, C2$ (рис. 2) отражают наличие блокировочных емкостей на полюсах выпрямителя и собственную емкость полюсов щита постоянного тока относительно земли. Емкости $C3, C4$ представляют емкость инжекционной развилки

ки [10, 11] системы контроля изоляции на землю. Емкости $Cf+$ и $Cf-$ отражают емкости контролируемого фидера. В общем случае они не равны между собой.

На схеме показаны вентили V1–V6 трехфазного управляемого выпрямителя схемы Ларионова. Этот выпрямитель, работая от сети промышленной частоты 50 Гц, на выходе имеет основную частоту пульсаций 300 Гц. На работу оперативных цепей эта составляющая не будет влиять при равенстве $C1 = C2$, $C3 = C4$, $Cf1_+ = Cf1_-$. Но на практике такое условие трудновыполнимо. Это обосновано как самой схемой вторичных оперативных цепей, так и возможными изменениями системных параметров – например, цепи питания защит какого-либо присоединения отключены, а идентичность цепей фидеров не обеспечена.

При работе трехфазного выпрямителя в спектре выпрямленного напряжения преобладает постоянная составляющая. Разложение в ряд Фурье показывает, что амплитуда первой гармоники выпрямленного напряжения составляет 1/18 от величины средневыпрямленного значения.

Был проведен физический эксперимент воздействия работы трехфазного мостового выпрямителя, работающего от источника трехфазной ЭДС с фазным напряжением 6В, на сигнал, получаемый на выходе канала IF.

Осциллограммы напряжений аналоговых выходов каналов напряжения U и канала тока фидера IF приведены на рис. 6. На напряжение с выхода выпрямителя проводилось наложение опорного напряжения частотой 20 Гц.

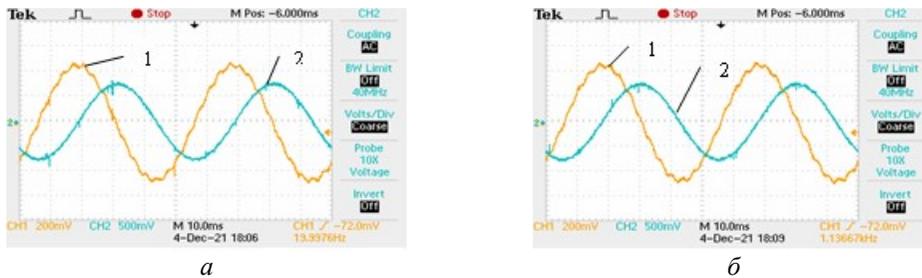


Рис. 6. Осциллограммы выходов аналоговых каналов системы контроля изоляции при воздействии источника опорного напряжения и работе трехфазного выпрямителя: *а* – при отсутствии утечки в зоне контролируемого фидера; *б* – при сопротивлении цепи 20 кОм в зоне контролируемого фидера, где 1 – выход канала IF, 2 – выход канала U

При отсутствии влияния работы трехфазного выпрямителя кривые канала тока фидера IF (кривые 1 рис. 6) будут синусоидальными без высших гармонических составляющих. Из рис. 6 видно, что при наличии разницы емкостей полюсов на землю осциллограммы выходов аналоговых каналов для случаев наличия замыкания в контролируемой зоне и случая отсутствия замыкания визуально неразличимы. Но обработка оцифрованных сигналов аналоговых каналов согласно выражению (2) дает устойчивый результат в вычислении значения активного сопротивления утечки R_{lek1} в зоне контролируемого фидера.

Осциллограммы, представленные на рис. 6, получены при протекании выпрямленного тока с выхода трехфазного выпрямителя, имеющего фазное напряжение на входе 6 В, и тока от источника опорного напряжения. Согласно расчетам величина ЭДС с частотой 300 Гц на стороне постоянного тока будет составлять 0.78 В реальном ЩПТ, для достижения средневыпрямленного значения

220 В необходимо 94 В фазного напряжения. При этом в спектре выпрямленного напряжения будет присутствовать составляющая 12.7 В с частотой 300 Гц.

Полученные в реальном электротехническом комплексе осциллограммы выходных аналоговых сигналов приведены на рис. 7 [10].

Как видно из спектра сигнала выхода канала тока фидера IF (рис. 7, б), преобладающим является сигнал с частотой опорного источника 20 Гц. Наводки с частотой 50 Гц практически подавлены. Но несмотря на низкую частоту среза фильтра 2 (рис. 4) частоты, кратные 50 Гц, в диапазоне до 350 Гц имеют значительную амплитуду.

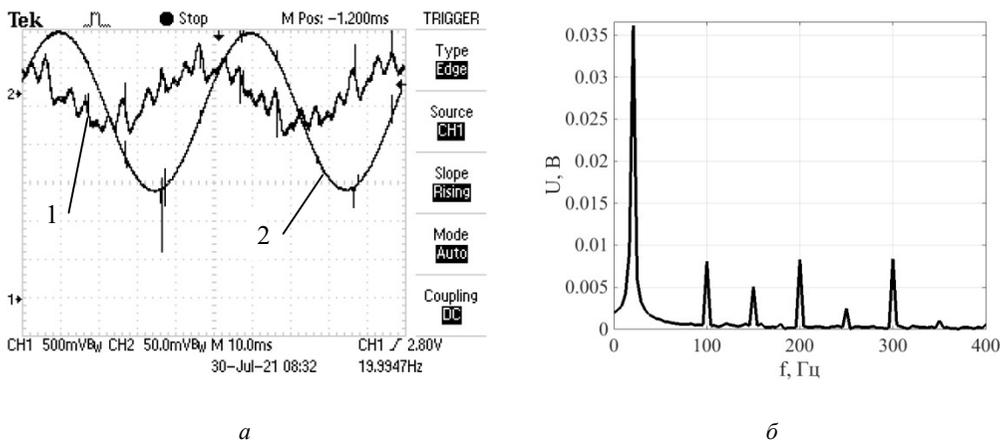


Рис. 7. Сигналы с выходов аналоговых каналов тока фидера IF и напряжения шин U: а – при работе системы контроля изоляции на землю; б – спектр сигнала канала тока IF

Чтобы ослабить влияние этих составляющих на результат работы системы контроля изоляции, сигналы с выхода аналоговых каналов подвергаются дополнительной селективной цифровой фильтрации.

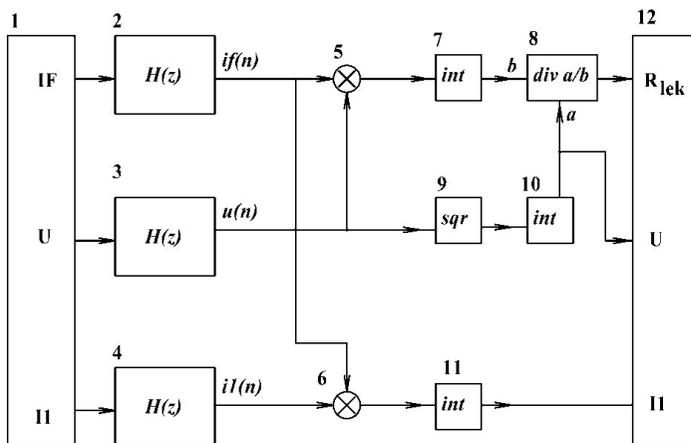


Рис. 8. Функциональная схема цифрового модуля системы контроля изоляции на землю: 1 – аналоговый модуль; 2, 3, 4 – цифровые фильтры; 5, 6 – умножители; 7, 10, 11 – интеграторы; 8 – делитель; 9 – возведение в квадрат; 12 – устройство отображения

Селективная фильтрация предназначена для выделения из сигналов с выходов аналоговых фильтров синусоидальных составляющих, частота которых равна 20 Гц. В основу положен цифровой фильтр прямой формы [19]. Частота дискретизации сигнала принята 100 Гц. Принятие такой низкой частоты дискретизации обусловлено низкой частотой опорного сигнала и кривой АЧХ, имеющей нуль при нормированной частоте, равной 1. Эта частота соответствует 50 Гц. Дополнительным плюсом будет запас процессорного времени для вычисления выходных отсчетов фильтра.

Фильтр синтезирован по аналоговому полосовому прототипу. Были заданы параметры: центральная частота 20 Гц ($\omega_0 = 125.6$), добротность $Q_F = 5$, усиление на центральной частоте $K_R = 1$. Передаточная функция полосового фильтра прототипа описывается выражением

$$T(s) = \frac{K_R \omega_0 s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q_F} s + \omega_0^2}.$$

При подстановке получаем выражение

$$T(s) = \frac{1.59 \cdot 10^{-3} s}{6.4 \cdot 10^{-5} s^2 + 1.59 \cdot 10^{-3} s + 1}.$$

Применяя инвариантное импульсное преобразование с частотой дискретизации 100 Гц, получим передаточную функцию цифрового фильтра:

$$H(z) = \frac{1z^0 - 1z^{-2}}{1 - 0.55z^{-1} + 0.77z^{-2}}. \quad (9)$$

Цифровые фильтры с передаточной функцией (9) представляют звенья 2, 3, 4 на функциональной схеме цифрового модуля. Для сокращения времени вычислений и упрощения машинного расчета коэффициенты числителя приняты равными 1.

После проведения фильтрации цифровые последовательности с фильтров 2 и 3 поступают на перемножитель 5. С перемножителя 5 данные поступают на интегратор 7, на выходе которого по истечении времени наблюдения формируется скалярное произведение векторов $if(n)$ и $u(n)$.

Сигнал с выхода цифрового фильтра 3 возводится в квадрат звеном 9 и поступает на интегратор 10, на выходе которого по истечении времени наблюдения формируется квадрат нормы сигнала $u(n)$. Делитель 8 находит отношение квадрата нормы $u(n)$ к скалярному произведению $if(n)$ и $u(n)$. Эта величина будет представлять сопротивление утечки в зоне контролируемого фидера сети постоянного тока.

Вывод

При установке в реальный щит постоянного тока устройства контроля изоляции, работающего по методу наложения внешнего опорного напряжения, нужно принять меры по сведению к минимуму разницы емкостей полюсов на землю. Это позволит уменьшить влияние на работу устройства контроля изоляции пульсаций, созданных выпрямительно-подзарядным агрегатом.

При работе устройства в целом наличие емкостной составляющей токовой помехи на частоте 300 Гц величиной до 20 мА не оказывало влияния на ток кон-

тролируемого фидера, т. к. наличие компенсационной обмотки электромагнитной части датчика тока компенсировало это воздействие, сохраняя линейность датчика тока, и позволяло работать системе устойчиво.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Солуянов Ю.И., Ахметшин А.Р., Солуянов В.И.* Актуализация удельных электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 3. С. 47–57. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-3-47-57
2. *Солуянов Ю.И., Ахметшин А.Р., Солуянов В.И.* Энерго-ресурсосберегающий эффект в системах электроснабжения жилых комплексов от актуализации нормативов электрических нагрузок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 1. С. 156–166. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-1-156-166
3. *Суслов К.В., Солонина Н.Н., Солонина З.В., Ахметшин А.Р.* Повышение точности определения места повреждения в линиях электропередачи // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 3(47). С. 3–13.
4. *Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Халтурин В.А.* Энергосберегающие решения в распределительных электрических сетях на основе анализа их фактических нагрузок // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 5(62). С. 68–73.
5. *Куликов А.Л., Ваняев В.В., Дарьенков А.Б., Шахов А.В.* Источник резервного электропитания с водородным топливным элементом и литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареей // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 3(15). С. 107–124. DOI 10.46960 / 2658-6754_2021_3_107
6. *Гуревич В.И.* Оперативные цепи постоянного тока. Проблемы контроля изоляции // Новости ЭлектроТехники. 2012. № 1(73). С. 30–32.
7. *Алимов Ю.Н., Галкин И.А., Шаварин Н.И.* Система контроля изоляции и поиска поврежденного фидера в цепях оперативного постоянного тока 220 В «ЭКРА-СКИ» // Новое в российской электроэнергетике. 2011. № 1. С. 44–52.
8. *Савельев В.А., Словесный С.А.* Контроль состояния изоляции цепей постоянного оперативного тока с компенсацией тока утечки // Повышение эффективности работы энергосистем. Труды ИГЭУ. М.: Энергоатомиздат, 2002. С. 418–429.
9. *Савельев В.А., Словесный С.А.* Способ контроля состояния изоляции цепей постоянного оперативного тока электростанций и подстанций // Повышение эффективности работы энергосистем. Труды ИГЭУ. М.: Энергоатомиздат, 2004. С. 466–478.
10. *Скрипачев М.О., Ведерников А.С.* Контроль изоляции присоединений цепей постоянного тока без отключения // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2015. № 7. С. 47–50.
11. Патент № 2612751 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/11. Способ поиска присоединений с пониженным сопротивлением изоляции на землю в цепях постоянного оперативного тока электрических станций и подстанций: № 2015148293; заявл. 10.11.2015; опубл. 13.03.2017 / А.С. Ведерников, М. О. Скрипачев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет».
12. Патент № 2310211 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/11. Способ поиска элемента с пониженным сопротивлением изоляции в разветвленной электрической сети постоянного оперативного тока: № 2006126946/28; заявл. 24.07.2006; опубл. 10.11.2007 / Р.А. Вайнштейн, В.В. Шестакова, И.С. Исаев, С.М. Юдин; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский политехнический университет».
13. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 1983. 536 с.
14. Патент на полезную модель № 203217 U1 Российская Федерация, МПК G01R 19/32. Первичный преобразователь тока: № 2020123285; заявл. 14.07.2020; опубл. 26.03.2021 / А.А. Яблоков, В. Д. Лебедев, А. В. Наумов [и др.]; заявитель Публичное акционерное общество «Межрегиональная распределительная сетевая компания Центра и Приволжья».
15. *Вахромов А.С., Ведерников А.С., Скрипачев М.О.* Моделирование электромагнитного датчика тока с компенсационной обмоткой // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. № 6. С. 72–76. DOI 10.17213/0136-3360-2016-6-72-76
16. *Лейтман М.Б., Мелик-Шахназаров А.М.* Компенсационные измерительные преобразователи электрических величин. М.: Энергия, 1978. 224 с.

17. *Пейтон А.Дж., Воли В.* Аналоговая электроника на операционных усилителях. М.: Бином, 1994. 352 с.
18. *Макаров И.М., Менский Б.М.* Линейные автоматические системы. М.: Машиностроение, 1982. 501 с.
19. *Лайонс Р.* Цифровая обработка сигналов. М.: Бином, 2007. 656 с.

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2021 г.

INFLUENCE OF OPERATING DC NETWORK PARAMETERS ON THE OPERATION INSULATION MONITORING SYSTEM ON THE GROUND

*M.O. Skripachev, A.S. Vedernikov**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskay st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: michael-ss@yandex.ru

Abstract. *Direct operating current system is a set of electrical devices and appliances, including power sources required for the functioning of the main technological complexes of enterprises. The features of direct current systems are a significant spatial distribution, susceptibility to strong electromagnetic interference and noise. A frequent fault in DC operating current systems isolated from the ground is the damage of the insulation of one pole to ground. This fault is not accompanied by large currents, but can cause false operation of the electrical system. In this paper we consider the method of searching for the faulty section, and analyze the occurrence of interference in the search system. The improved search system based on the external reference voltage superimposition method has confirmed its performance in real objects.*

Keywords: *DC operating current system, insulation monitoring system, DC switchboard, external reference voltage superposition.*

REFERENCES

1. Soluyanov Yu.I., Ahmetshin A.R., Soluyanov V.I. Aktualizaciya udel'nyh elektricheskikh nagruzok pomeshchenij obshchestvennogo naznacheniya, vstroennyh v zhilye zdaniya // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki. 2021. T. 23. № 3. P. 47–57. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-3-47-57
2. Soluyanov Yu.I., Ahmetshin A.R., Soluyanov V.I. Energo-resursoberegayushchij effekt v sistemah elektrosnabzheniya zhilyh kompleksov ot aktualizacii normativov elektricheskikh nagruzok // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki. 2021. T. 23. № 1. P. 156–166. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-1-156-166
3. Suslov K.V., Solonina N.N., Solonina Z.V., Ahmetshin A.R. Povyshenie tochnosti opredeleniya mesta povrezhdeniya v liniyah elektroperedachi // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2020. T. 12. № 3(47). P. 3–13.
4. Soluyanov Yu.I., Fedotov A.I., Ahmetshin A.R., Halturin V.A. Energoberegayushchie resheniya v raspredelitel'nyh elektricheskikh setyah na osnove analiza ih fakticheskikh nagruzok // Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie. 2020. № 5(62). P. 68–73.
5. Kulikov A.L., Vanyaev V.V., Dar'enkova A.B., Shahov A.V. Istochnik rezervnogo elektropitaniya s vodorodnym toplivnym elementom i litij-zhelezo-fosfatnoj akkumulyatornoj batareej // Intellektual'naya elektrotehnika. 2021. № 3(15). P. 107–124. DOI 10.46960/2658-6754_2021_3_107
6. Gurevich V.I. Operativnye cepi postoyannogo toka. Problemy kontrolya izolyacii. // Novosti ElektroTehniky. 2012. № 1(73). P. 30–32.
7. Alimov Yu.N., Galkin I.A., Shavarin N.I. Sistema kontrolya izolyacii i poiska povrezhdennoho fidera v cepyah operativnogo postoyannogo toka 220 V “EKRA-SKI” // Novoe v rossijskoj elektroenergetike. 2011. № 1. P. 44–52.
8. Savel'ev V.A., Slovesnyj S.A. Kontrol' sostoyaniya izolyacii cepej postoyannogo operativnogo toka s kompensaciej toka utechki // Povyshenie effektivnosti raboty energosistem: Trudy IGEU. M.: Energoatomizdat, 2002. P. 418–429.

* *Mikhail O. Skripachev, Senior Lecturer.
Alexander S. Vedernikov, Ph. D. (Techn.), Associate Professor.*

9. *Savel'ev V.A., Slovesnyj S.A.* Sposob kontrolya sostoyaniya izolyacii cepej postoyannogo operativnogo toka elektrostancij i podstancij // *Povyshenie effektivnosti raboty energosistem: Trudy IGEU.* M.: Energoatomizdat, 2004. P. 466–478.
10. *Skripachev M.O., Vedernikov A.S.* Kontrol' izolyacii prisoedinenij cepej postoyannogo toka bez otklyucheniya // *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont.* 2015. № 7. P. 47–50.
11. Patent № 2612751 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK G01R 31/11. Sposob poiska prisoedinenij s ponizhennym soprotivleniem izolyacii na zemlyu v cepyah postoyannogo operativnogo toka elektricheskikh stancij i podstancij: № 2015148293: zayavl. 10.11.2015: opubl. 13.03.2017 / *A.S. Vedernikov, M.O. Skripachev*; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya "Samarskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet".
12. Patent № 2310211 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK G01R 31/11. Sposob poiska elementa s ponizhennym soprotivleniem izolyacii v razvetvlennoj elektricheskoj seti postoyannogo operativnogo toka: № 2006126946/28: zayavl. 24.07.2006: opubl. 10.11.2007 / *R.A. Vajnshtejn, V.V. Shestakova, I.S. Isaev, S.M. Yudin*; zayavitel' Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya Tomskij politekhnicheskij universitet.
13. *Baskakov S.I.* Radiotekhnicheskie cepi i signaly. M.: Vysshaya shkola, 1983. 536 pp.
14. Patent na poleznuyu model' № 203217 U1 Rossijskaya Federaciya, MPK G01R 19/32. Perichnyj preobrazovatel' toka: № 2020123285: zayavl. 14.07.2020 : opubl. 26.03.2021 / *A.A. Yablokov, V.D. Lebedev, A.V. Naumov* [i dr.]; zayavitel' Publichnoe akcionernoje obshchestvo «Mezhregional'naya raspreditel'naya setevaya kompaniya Centra i Privolzh'ya».
15. *Vahromov A.S., Vedernikov A.S., Skripachev M.O.* Modelirovanie elektromagnitnogo datchika toka s kompensacionnoj obmotkoj // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika.* 2016. № 6. P. 72–76. DOI 10.17213/0136-3360-2016-6-72-76
16. *Lejtman M.B., Melik-Shahnazarov A.M.* Kompensacionnye izmeritel'nye preobrazovateli elektricheskikh velichin. M.: Energiya, 1978. 224 pp.
17. *Pejton A.Dzh., Volsh V.* Analogovaya elektronika na operacionnyh usilitelyah. M.: Binom, 1994. 352 pp.
18. *Makarov I.M., Menskij B.M.* Linejnye avtomaticheskie sistemy. M.: Mashinostroenie, 1982. 501 pp.
19. *Lajons R.* Cifrovaya obrabotka signalov. M.: Binom, 2007. 656 pp.