



Ивановский государственный энергетический университет

Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ)

Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Vestnik IGEU)

Журнал издается с 2001 года

ISSN 2072-2672

Индекс 18079

2025 / Вып. 6

Учредитель: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Г.В. Ледуховский, д-р техн. наук (Иваново)
(главный редактор)
И.К. Муравьев, канд. техн. наук (Иваново)
(зам. главного редактора)
Е.Н. Бушуев, д-р техн. наук (Иваново)
А.Р. Гайдук, д-р техн. наук (Таганрог)
В.П. Жуков, д-р техн. наук (Иваново)
Ю.Б. Казаков, д-р техн. наук (Иваново)
А.Б. Капранова, д-р физ.-мат. наук (Ярославль)
С.В. Ключина, нач. УИУНЛ (Иваново)
А.Р. Колганов, д-р техн. наук (Иваново)
С.В. Косяков, д-р техн. наук (Иваново)
В.В. Курейчик, д-р техн. наук (Таганрог)
М.Ш. Мисриханов, д-р техн. наук (Москва)
А.В. Митрофанов, д-р техн. наук (Иваново)
А.Ю. Мурзин, канд. техн. наук (Иваново)
В.Ф. Очков, д-р техн. наук (Москва)
С.В. Тарарыкин, д-р техн. наук (Иваново)
М.Ю. Таршис, д-р техн. наук (Ярославль)
А.И. Тихонов, д-р техн. наук (Иваново)
В.А. Шуин, д-р техн. наук (Иваново)

Над номером работали:

Ответственные за выпуск: Е.Н. Бушуев, А.Ю. Мурзин,
А.И. Тихонов, А.Р. Колганов, С.В. Косяков

Начальник УИУНЛ
Технический редактор
Редактор

С.В. Ключина
Н.В. Королева
С.М. Коткова

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Д.С. Агапов, А.П. Картошкин, М.И. Куколев. Комплексная параметрическая оптимизация структурно дифференцированных теплотехнических систем.....**5**

А.Б. Ларин, Б.М. Ларин, Е.Г. Ухалова, М.П. Савинов, К.В. Зотова, С.В. Киет. Расчетно-теоретическое обоснование определения концентрации углекислоты в паре энергетических котлов и парогенераторов.....**10**

М.В. Козлова, А.В. Банников, В.В. Смирнов, Р.Д. Семяшкин. Перспективы использования низкопотенциальных источников энергии в системах опреснения на базе газоконтактных установок.....**17**

А.К. Соколов. Использование охранных нагревателей для создания адиабатных условий в теплофизических экспериментах.....**28**

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Д.Н. Кормилицын, О.С. Суханова. Оценка статической устойчивости системы из двух генераторных станций с управляемой линией электропередачи по характеристическому уравнению.....**36**

П.В. Яковлев, И.Н. Сулыненков. Обоснование возможности диагностики межвиткового короткого замыкания обмотки асинхронного электродвигателя применением тепловизионной съемки.....**43**

А.Н. Антонов, В.Д. Лебедев. Исследование феррорезонансных явлений в электромагнитных трансформаторах напряжения сетей 6–10 кВ при воздействии дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю.....51

С.Н. Литвинов. Численное моделирование датчиков частичных разрядов на основе метода конечных элементов для задач диагностики изоляции.....58

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

А.С. Глазырин, Е.И. Попов, В.А. Копырин. Методика проекционной идентификации параметров настраиваемой модели синхронного двигателя с постоянными магнитами и индикаторы информативности конечных фрагментов данных.....69

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

В.П. Жуков, А.Н. Беляков, С.Д. Горшенин, С.А. Смирнов. Моделирование колебательно-го движения пузырька газа в слое жидкости.....79

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Е.Р. Пантелеев. Синтез вопросов контроля результатов обучения методом инверсии аксиом модели предметных знаний.....86

Памяти Дмитрия Павловича Ледянкина
(к 110-летию со дня рождения).....94

Журнал «Вестник Ивановского государственного энергетического университета» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям: 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами; 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования; 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы; 2.4.3. Электроэнергетика; 2.4.5. Энергетические системы и комплексы; 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника; 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

Предоставляется информация об опубликованных статьях в систему РИНЦ согласно договору № 580-12/2012 ЛО от 13 декабря 2012 г. с ООО «Научная электронная библиотека».

Журнал зарегистрирован в базе данных Ulrich's (США).



Ivanovo State Power Engineering University

Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University (Bulletin ISPEU)

The Journal has been published since 2001

ISSN 2072-2672

2025 / Issue 6

Founder: Federal State-Financed Educational Institution of Higher Professional Education «Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin»

EDITORIAL BOARD:

G.V. Ledukhovskiy, Doctor of Engineering (Ivanovo)
(Chief Editor)
I.K. Muravyev, Candidate of Engineering (Ivanovo)
(Chief Editor Assistant)
E.N. Bushuyev, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.R. Gaiduk, Doctor of Engineering (Taganrog)
V.P. Zhukov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
Yu.B. Kazakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.B. Kapranova, Doctor of Physics and Mathematics
(Yaroslavl)
S.V. Klyunina (Ivanovo)
A.R. Kolganov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
S.V. Kosyakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.V. Kureychik, Doctor of Engineering (Taganrog)
M.Sh. Misrikhanov, Doctor of Engineering (Moscow)
A.V. Mitrofanov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.Yu. Murzin, Candidate of Engineering (Ivanovo)
V.F. Ochkov, Doctor of Engineering (Moscow)
S.V. Tararykin, Doctor of Engineering (Ivanovo)
M.Yu. Tarshis, Doctor of Engineering (Yaroslavl)
A.I. Tikhonov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.A. Shuin, Doctor of Engineering (Ivanovo)

The issue is prepared by:

Responsible people for the issue:

E.N. Bushuyev, A.Yu. Murzin, A.I. Tikhonov,
A.R. Kolganov, S.V. Kosyakov

Chief of Educational and Scientific

Literature Publishing Office

Technical Editor

Editor

S.V. Klyunina

N.V. Koroleva

S.M. Kotkova

CONTENT

HEAT AND POWER ENGINEERING

D.S. Agapov, A.P. Kartoshkin, M.I. Kukolev.
Complex parametric optimization of structurally
differentiated heat engineering systems.....**5**

**A.B. Larin, B.M. Larin, E.G. Ukhalova,
M.P. Savinov, K.V. Zotova, S.V. Kiet.**
Computational and theoretical justification to
determine the concentration of carbon dioxide
in the steam of power boilers and steam
generators.....**10**

**M.V. Kozlova, A.V. Bannikov, V.V. Smirnov,
R.D. Semyashkin.** Prospects for the use of low-
potential energy sources in desalination systems
based on gas-contact installations**17**

A.K. Sokolov. On the use of guarding heaters to
create adiabatic conditions in thermophysical
experiments.....**28**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

D.N. Kormilitsyn, O.S. Sukhanova.
Assessment of static stability of a system of two
generator stations with a controlled power
transmission line by characteristic equation.....**36**

P.V. Yakovlev, I.N. Sulynenkov. Justification
of the possibility to diagnose an inter-turn short
circuit in the winding of an asynchronous electric
motor using thermal imaging.....**43**

A.N. Antonov, V.D. Lebedev. Study of ferro-
resonance phenomena in 6–10 kV electromagnetic
voltage transformers when exposed to intermittent
single-phase earth faults.....**51**

S.N. Litvinov. Numerical simulation of partial discharge sensors based on the finite element method for insulation diagnostics.....58

ELECTROMECHANICS

A.S. Glazyrin, E.I. Popov, V.A. Kopyrin. Methodology for parameters projection identification of an adaptive permanent magnet synchronous motor and informativity indicators of finite data fragments.....69

MATHEMATICAL METHODS IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY

V.P. Zhukov, A.N. Belyakov, S.D. Gorshenin, S.A. Smirnov. Modeling the oscillatory motion of a gas bubble in a liquid layer.....79

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGIES

E.R. Panteleev. Synthesis of control questions on learning outcomes using the axiom inversion method of subject knowledge model.....86

In Memory of Dmitry Pavlovich Ledyankin (on the 110th Anniversary of his Birth).....94

The Journal «Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University» is included in the List of Leading Reviewed Scientific Journals and Publications, which are approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for publishing the main scientific results of the dissertations on the candidate and doctoral degrees for the following groups of specialties: 2.3.3. Automation and Control of Technological Processes and Production; 2.3.7. Computer Simulation and Computer-Aided Design; 2.4.2. Electrotechnical Complexes and Systems; 2.4.3. Electric Power Industry; 2.4.5. Energy Systems and Complexes; 2.4.6. Theoretical and Applied Heat Engineering; 2.6.13. Processes and Apparatuses of Chemical Technologies.

Information about published articles is sent to the Russian Science Citation Index by agreement with «Scientific Electronic Library» Ltd. No. 580-12/2012 LO of December 13, 2012.

The journal is registered in the foreign database Ulrich's Periodicals Directory.

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 62-97/-98

Дмитрий Станиславович Агапов

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили, тракторы и технический сервис», Россия, Пушкин, e-mail: different76@list.ru

Александр Петрович Картошкин

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили, тракторы и технический сервис», Россия, Пушкин, телефон (812) 470-04-22, e-mail: akartoshkin@yandex.ru

Максим Игоревич Куколев

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доктор технических наук, профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства; Инженерно-строительный институт, Россия, Санкт-Петербург, телефон (812) 552-64-01, e-mail: maksim.kukolev@spbstu.ru

Комплексная параметрическая оптимизация структурно дифференцированных теплотехнических систем

Авторское резюме

Состояние вопроса. Эффективность работы теплотехнических систем определяется как их структурой, так и режимами функционирования. Любая теплотехническая система на протяжении всего жизненного цикла (от синтеза, включая эксплуатацию, до утилизации) подвергается структурной и параметрической оптимизации. Анализ существующих данных показывает, что к настоящему моменту накоплен опыт совершенствования структуры систем на этапах создания и реконструкции, заложены основы структурного совершенства нестационарных систем, а также с учетом различной локализации отдельных элементов системы на основе пинч-технологии. С другой стороны, известны методы оптимизации рабочих параметров систем на основе энтальпийных и эксергетических показателей. Эти методы рассматривают, как правило, систему в целом, без декомпозиции на отдельные подсистемы. Это обусловлено тем обстоятельством, что не всегда совершенство отдельного элемента системы аддитивно или мультипликативно определяет глобальное совершенство системы в целом. В связи с этим появляется принципиальная возможность использования низкокэффективных устройств для построения совершенных систем.

Материалы и методы. Используемые сегодня методы структурной и параметрической оптимизации позволяют вести синтез систем и поиск оптимальных рабочих параметров с учетом термозкономических показателей, таких как стоимость единицы теплоты, эксергии и других видов энергетических и материальных ресурсов.

Результаты. Разработан метод комплексной оптимизации теплотехнических систем, позволяющий производить комплексную параметрическую оптимизацию структурно дифференцированных систем. На примере газопоршневой когенерационной установки JMS 612 GS-B.L определены оптимальные регулировочные параметры ее функционирования.

Выводы. Предложенный метод комплексной параметрической оптимизации структурно дифференцированных систем может применяться как на этапе синтеза теплотехнических систем, так и в процессе реконструкции. Определенные в процессе исследования оптимальные параметры функционирования установки JMS 612 GS-B.L могут быть использованы при ее эксплуатации.

Ключевые слова: параметрическая оптимизация, транспортировка теплоты, термомеханическая эксергия, эффективность теплотехнических систем

Dmitry Stanislavovich Agapov

Saint Petersburg State Agrarian University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Cars, Tractors and Technical Service Department, Russia, Pushkin, e-mail: different76@list.ru

Alexander Petrovich Kartoshkin

Saint Petersburg State Agrarian University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Cars, Tractors and Technical Service Department, Russia, Pushkin, telephone (812) 470-04-22, e-mail: akartoshkin@yandex.ru

Maksim Igorevich Kukolev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of the Higher School of Hydraulic and Power Engineering; Civil Engineering Institute, Russia, St. Petersburg, telephone (812) 552-64-01, e-mail: maksim.kukolev@spbstu.ru

Complex parametric optimization of structurally differentiated heat engineering systems

Abstract

Background. The efficiency of heat engineering systems is determined by both their structure and operating modes. Any heat engineering system is subject to structural and parametric optimization throughout its entire life cycle (from synthesis, including operation, to disposal). Analysis of existing data shows that by now experience has been accumulated to improve the structure of systems at the stages of creation and reconstruction. The foundations have been laid for the structural perfection of non-stationary systems, as well as taking into account the different localization of individual elements of the system based on pinch technology. On the other hand, methods are known for optimizing the operating parameters of systems based on enthalpy and exergy indicators. These methods as a rule consider the system as a whole, without decomposing it into individual subsystems. It is due to the fact that the perfection of an individual system element does not always additively or multiplicatively determine the overall perfection of the system as a whole. Thus, it is a possibility in principle to use low-efficiency devices to develop perfect systems.

Materials and methods. The methods of structural and parametric optimization used today allow us to synthesize systems and search for optimal operating parameters taking into account thermo-economic indicators, such as the cost of a unit of heat, exergy and other types of energy and material resources.

Results. A method for complex optimization of heat engineering systems has been developed, allowing for complex parametric optimization of structurally differentiated systems. Using the example of the gas piston cogeneration JMS 612 GS-B.L unit, the optimal control parameters of its operation have been determined.

Conclusions. The proposed method for complex parametric optimization of structurally differentiated systems can be used both at the stage of synthesis of heat engineering systems and in the process of reconstruction. The optimal parameters of the operation of the JMS 612 GS-B.L unit determined during the study can be used during its operation.

Key words: parametric optimization, heat transport, thermomechanical exergy, efficiency of heating systems

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.005-009

Введение. При рассмотрении небольших систем, находящихся в одном помещении, возможно вести структурную оптимизацию. При этом можно рассматривать систему в целом, поскольку создание внутрисистемных теплообменных связей не вызывает технических затруднений и существенных потерь при транспортировке теплоты [1, 2, 3, 4, 5]. В случае более глобальных систем (например, нефтеперегонный завод или пищевой комбинат) создание отдельных теплообменных связей может быть экономически нецелесообразно из-за преобладающих энергетических потерь при передаче теплоты или высоких капитальных затрат при создании связи [6]. Настоящее исследование направлено на комплексную оптимизацию таких структурно дифференцированных систем, что представляет актуальную задачу современной энергетики [7, 8, 9].

Структурно дифференцированные системы нередко возникают при многоэтапном производстве конечной продукции с отдельными производственными циклами получения промежуточных продуктов и полуфабрикатов.

Комплексная оптимизация позволяет определить наилучшую структуру системы и подобрать оптимальные рабочие параметры функционирования этой системы. Целью настоящего исследования является разработка метода комплексной оптимизации теплотехнических систем.

Методы исследования. Поиск оптимального комплексного структурно-параметрического решения системы начинается с декомпозиции системы на кластеры экономически приемлемых теплообменных связей. Это такие части системы, в которых создание теплообменных связей является экономически оправданным решением с учетом всех капитальных и эксплуатационных расходов.

Грубо учесть экономически неприемлемые связи можно, задав снижение температуры потока при транспортировке теплоты с помощью промежуточного агента. При этом необходимо повторно провести пинч-анализ, и если структурное решение изменится, то это указывает на экономически неприемлемую теплооб-

менную связь. Она неприемлема пока только энергетически, но если добавить капитальные и эксплуатационные расходы, то картина может только усугубиться.

Задать снижение температуры потока при транспортировке теплоты можно эмпирически, учитывая опыт эксплуатации теплосетей с похожими термодинамическими параметрами теплоносителя. При отсутствии опытных данных снижение температуры потока при транспортировке теплоты можно определить расчетным путем на основе двух уравнений: теплопередачи и теплоемкости:

$$\delta\Phi = k(T - T_0)dS; \quad (1)$$

$$\delta\Phi = Gc_p(-dT), \quad (2)$$

где Φ – тепловой поток от агента к окружающей среде, Вт; k – коэффициент теплопередачи теплоты от агента к окружающей среде, Вт/(м²·град); T и T_0 – температуры агента и окружающей среды соответственно, град; S – среднее логарифмическая площадь теплообменной поверхности, м²; G – массовый расход теплоносителя, кг/с; c_p – удельная изобарная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·град).

Частным решением системы из уравнений (1) и (2) будет уравнение

$$\Delta T_{\text{кон}} = \Delta T_{\text{нач}} e^{-\frac{k}{G \cdot c_p} S_{\text{общ}}}. \quad (3)$$

Тогда снижение температуры потока при транспортировке теплоты составит $\Delta T_{\text{нач}} - \Delta T_{\text{кон}}$.

Определив с помощью пинч-технологии структурные решения подсистем, перейдем к их параметрической оптимизации. Чтобы оптимизировать рабочие параметры i -й структурной группы, необходимо для каждой такой подсистемы определить критерий оптимизации (целевую функцию) F_i , варьируемые (регулируемые) параметры \bar{X}_i , уравнения связи этих параметров в неявном виде и граничные условия $\varphi_i(\bar{X})$.

Поскольку целей может быть несколько, то желательно свести задачу к одному критерию, чтобы упростить поиск решения. Это достигается назначением весовых коэффициентов каждого критерия. Так, например, потери энергии, эксплуатационные и капитальные затраты, а также показатели надежности и долговечности можно выразить через стоимость в денежных единицах, получив единый обобщенный критерий оптимизации для i -й структурной группы $F_i(\bar{X}_i)$.

Таким образом, имеем:

$$F_i(\bar{X}_i) \rightarrow \text{extr},$$

$$\varphi_{i,j}(\bar{X}_i) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

$$\varphi_{i,k}(\bar{X}_i) \geq 0,$$

$$\varphi_{i,l}(\bar{X}_i) \leq 0.$$

При этом следует помнить, что число ограничений-равенств должно быть меньше числа переменных \bar{X}_i , а количество ограничений-неравенств может быть произвольным.

Подобные задачи решаются численными методами математического программирования, однако в большинстве случаев, когда задача имеет небольшую размерность (количество неизвестных), удобно использовать метод Лагранжа [1]. Метод множителей Лагранжа широко используется для решения сложных задач ограниченной оптимизации и является одним из основных методов решения задач на поиск условного экстремума в математическом анализе. Он не только широко используется для нелинейной оптимизации, но и лежит в основе еще более сложных методов оптимизации, несмотря на отдельные недостатки.

Этот метод позволяет задачу поиска условного экстремума целевой функции на множестве допустимых значений преобразовать к задаче безусловной оптимизации функции L_i :

$$L_i(\bar{X}_i, \bar{\lambda}_i) = F_i(\bar{X}_i) + \sum_{j=1}^{j=m} (\lambda_{i,j} \varphi_{i,j}). \quad (4)$$

Необходимым условием использования метода Лагранжа является преобразование неравенств в равенства путем добавления дополнительных переменных \bar{X}_i , число которых равно числу этих неравенств. Кроме того, вводятся дополнительные переменные λ_i , число которых равно общему числу ограничений задачи. Таким образом, решение задачи методом Лагранжа повышает ее размерность за счет включения дополнительных переменных. Этот недостаток ограничивает область применения метода Лагранжа сравнительно простыми задачами, поэтому с повышением числа переменных и ограничений целесообразно переходить к численным методам математического программирования.

Суть метода Лагранжа заключается в том, что в точке экстремума все частные производные равны нулю:

$$\frac{\partial L_i}{\partial \bar{X}_i} = \frac{\partial L_i}{\partial \lambda_{i,j}} = 0. \quad (5)$$

Зависимость (5) позволяет найти экстремум при условии независимости переменных \bar{X}_i и λ_i , т.е., когда они не оказывают никакого влияния друг на друга. Если для переменных это условие выполняется автоматически, то для вектора \bar{X}_i это не всегда так. В случае наличия связи между переменными \bar{X}_i должен быть найден условный экстремум функции L_i , что достигается введением дополнительных уравнений связи $\varphi_i(\bar{X})$.

Таким образом, осуществляется локальная параметрическая оптимизация для каждой структурной группы. Однако, как было показано

выше, совершенство отдельных подсистем не всегда обуславливает глобальное совершенство системы, поэтому глобальная параметрическая оптимизация структурно дифференцированных систем должна осуществляться на аддитивной основе, но со своими весовыми коэффициентами k_i :

$$L = \sum_{i=1}^{i=n} (k_i L_i). \quad (6)$$

При этом оптимизация осуществляется по всем переменным локальных подсистем.

В качестве примера приведем результаты параметрической оптимизации когенерационной установки JMS 612 GS-B.L на основе термозакономерного анализа [1, 10].

Для данной установки в качестве целевой функции было составлено уравнение стоимости всех энергетических потоков (7):

$$C = c_{\text{см}} Ex_{\text{см}} + c_{\text{о.ж}} Ex_{\text{о.ж}} + c_{\text{инт.1}} Ex_{\text{инт.1}} + c_{\text{инт.2}} Ex_{\text{инт.2}} + c_{\text{см}} Ex_{\text{см}} + c_l Ex_l + c_T Ex_T, \quad (7)$$

где C – суммарная стоимость всех энергетических потоков установки (целевая функция), руб.; $Ex_{\text{см}}$, $Ex_{\text{о.ж}}$, $Ex_{\text{инт.1}}$, $Ex_{\text{инт.2}}$, Ex_l , Ex_T – значения термомеханической эксергии смазочного масла, охлаждающей жидкости, потока воздуха интеркулера первой ступени, потока воздуха интеркулера второй ступени, механической работы и теплоты соответственно, Дж; $c_{\text{см}}$, $c_{\text{о.ж}}$, $c_{\text{инт.1}}$, $c_{\text{инт.2}}$, c_l – стоимости единицы термомеханической эксергии смазочного масла, охлаждающей жидкости, потока воздуха интеркулера первой ступени, потока воздуха интеркулера второй ступени и механической работы соответственно.

В качестве регулировочных параметров оптимизации выступают: частота вращения коленчатого вала ДВС n , мин⁻¹; угол опережения зажигания Θ , град. п.к.в.; температура наддувочного воздуха t_k , °C; температура охлаждающей жидкости $t_{\text{ж}}$, °C; нагрузочный фактор β (положение органа управления подачей топлива).

В качестве уравнений связи параметров оптимизации выступают функции стоимости эксергий от регулировочных параметров: смазочного масла $f_{Ex_{\text{см}}}$; охлаждающей жидкости $f_{Ex_{\text{о.ж}}}$; потока воздуха интеркулера первой ступени $f_{Ex_{\text{инт.1}}}$; потока воздуха интеркулера второй ступени $f_{Ex_{\text{инт.2}}}$ и механической работы f_{Ex_l} , а также функции стоимости единицы эксергии от регулировочных параметров: смазочного масла $f_{c_{\text{см}}}$; охлаждающей жидкости $f_{c_{\text{о.ж}}}$; потока воздуха интеркулера первой ступени $f_{c_{\text{инт.1}}}$; потока воздуха интеркулера второй ступени $f_{c_{\text{инт.2}}}$ и механической работы f_{c_l} .

Функциональные зависимости потоков эксергии от оптимизируемых параметров определены в ходе экспериментов по уточнению теплового баланса энергоустановок:

$$\begin{cases} Ex_{\text{см}} = f_{Ex_{\text{см}}}(n; \Theta; t_k; t_{\text{ж}}; \beta), \\ Ex_{\text{о.ж}} = f_{Ex_{\text{о.ж}}}(n; \Theta; t_k; t_{\text{ж}}; \beta), \\ Ex_{\text{инт.1}} = f_{Ex_{\text{инт.1}}}(n; \Theta; t_k; t_{\text{ж}}; \beta), \\ Ex_{\text{инт.2}} = f_{Ex_{\text{инт.2}}}(n; \Theta; t_k; t_{\text{ж}}; \beta), \\ Ex_l = f_{Ex_l}(n; \Theta; t_k; t_{\text{ж}}; \beta), \\ c_{\text{см}} = f_{c_{\text{см}}}(Ex_{\text{см}}; Ex_{\text{о.ж}}; Ex_{\text{инт.1}}; Ex_{\text{инт.2}}; Ex_l; Ex_T), \\ c_{\text{о.ж}} = f_{c_{\text{о.ж}}}(Ex_{\text{см}}; Ex_{\text{о.ж}}; Ex_{\text{инт.1}}; Ex_{\text{инт.2}}; Ex_l; Ex_T), \\ c_{\text{инт.1}} = f_{c_{\text{инт.1}}}(Ex_{\text{см}}; Ex_{\text{о.ж}}; Ex_{\text{инт.1}}; Ex_{\text{инт.2}}; Ex_l; Ex_T), \\ c_{\text{инт.2}} = f_{c_{\text{инт.2}}}(Ex_{\text{см}}; Ex_{\text{о.ж}}; Ex_{\text{инт.1}}; Ex_{\text{инт.2}}; Ex_l; Ex_T), \\ c_l = f_{c_l}(Ex_{\text{см}}; Ex_{\text{о.ж}}; Ex_{\text{инт.1}}; Ex_{\text{инт.2}}; Ex_l; Ex_T). \end{cases} \quad (8)$$

Условия, представленные в виде неравенств (например, минимальная нагрузка не может быть менее 40 %), были преобразованы в равенства.

После того как все ограничения при поиске оптимальных параметров системы были заданы равенствами, была составлена регулярная функция Лагранжа, которую нашли при условии равенства нулю частных производных по всем оптимизируемым параметрам.

Результаты исследования. В результате решения получены следующие оптимальные параметры когенерационной установки JENBACHER шестого модельного ряда JMS 612 GS-B.L: $n = 1837$ мин⁻¹; $\Theta = 26,2$ град. п.к.в.; $T_k = 177,18$ °C; $T_{\text{ж}} = 117,5$ °C; $\beta = 0,962$.

При стоимости газа в ценах 2017 года $c_{Ex_T} = 5,1$ руб/м³ и его эксергии $Ex_T = 35$ МДж/м³ стоимость вырабатываемой механической энергии составила $c_{Ex_l} = 0,51$ руб/(кВт·ч) = 0,188 руб/МДж, а теплоты – $c_{Ex_Q} = 0,365$ руб/(кВт·ч) = 0,101 руб/МДж.

Выводы. Таким образом, в результате параметрической оптимизации установки JMS 612 GS-B.L на основе термозакономерного анализа определение оптимальных параметров работы композитных систем возможно на любом уровне декомпозиции. Так, например, можно разделить всю установку на отдельные энергосистемы (газоводные теплообменники, ДВС, насосы), составить функции Лагранжа для них, а затем по уравнению (6) определить оптимальные параметры всей установки. То же справедливо и в направлении укрупнения: например, если данная установка работает в составе какого-либо производственного оборудования или энергосистемы, то функция (6) войдет в состав более глобальной Лагранжевой функции со своим весовым коэффициентом.

Список литературы

1. Картошкин А.П., Агапов Д.С. Ресурсосбережение при проектировании и эксплуатации технологического оборудования энергетических систем. – СПб.: Проспект Науки, 2021. – 311 с.

2. Тверской Ю.С., Муравьев И.К. О методологии структурного синтеза эффективных систем управления технологическим процессом // Газотурбинные технологии. – 2022. – № 5(188). – С. 32–37. – EDN IIXOJY.

3. Матричная модель цифрового двойника энергетического оборудования / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский, К.Н. Бубнов // Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики: материалы I Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Ульяновск, 6–7 октября 2021 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2021. – С. 14–18. – EDN ANWXBG.

4. Горбунов В.А., Лоншаков Н.А., Дунаев В.А. Повышение эффективности эксплуатации тепломеханического оборудования АЭС // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI Междунар. науч.-техн. конф., Иваново, 9–13 ноября 2015 года. Т. 2. – Иваново, 2015. – С. 335–338. – EDN WASQHB.

5. Киселев В.Г., Калюттик А.А., Куколев М.И. Металлоемкость тепловых машин и теплоемкость их рабочего тела // Проблемы региональной энергетики. – 2020. – № 2(46). – С. 53–64. DOI: 10.5281/zenodo.3898237. – EDN GRGKIG.

6. Совершенствование пинч-технологии для возможности интеграции нестационарных тепловых процессов с учетом их локализации / Д.С. Агапов, А.П. Картошкин, А.А. Калюттик, А.В. Кондрашов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 5. – С. 115–125. DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-5-115-125.

7. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения / под ред. В.М. Бродянского. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.

8. Тсатсаронис Д. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергосберегающей системы / пер. с англ. Т.В. Морозюк. – Одесса: Студия «Негоциант», 2002. – С. 152.

9. Луканин П.В. Оценка энергетической эффективности производства сульфатной целлюлозы методом приращения эксергий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 3–11. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-2-3-11. – EDN WOZNTV.

10. Belinskaia I., Agapov D. Parametric optimization of energy conversion systems based on thermo economic indicators // Engineering for Rural Development: Proceedings, Jelgava, 25–27 May 2016. Vol. 15. – Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2016. – P. 274–277. – EDN WPFVQF.

References

1. Kartoshkin, A.P., Agapov, D.S. *Resursosberezhenie pri proektirovanii i ekspluatatsii tekhnologicheskogo oborudovaniya energeticheskikh sistem* [Resource conservation in the design and operation of process equipment for power systems]. Saint-Petersburg: Prospekt Nauki, 2021. 311 p.

2. Tverskoy, Yu.S., Murav'ev, I.K. O metodologii strukturnogo sinteza effektivnykh sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami [On the methodology of structural synthesis of efficient process control systems].

Gazoturbinnnye tekhnologii, 2022, no. 5(188), pp. 32–37. EDN IIXOJY.

3. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Ledukhovskiy, G.V., Bubnov, K.N. *Matrichnaya model' tsifrovogo dvoynika energeticheskogo oborudovaniya* [Matrix model of the digital twin of power equipment]. *Materialy I Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Razvitie metodov prikladnoy matematiki dlya resheniya mezhdistsiplinarnykh problem energetiki»*, Ul'yanovsk, 6–7 oktyabrya 2021 goda [Proceedings of the 1st All-Russian scientific and technical conference with international participation "Development of applied mathematics methods for solving interdisciplinary problems of energy", Ulyanovsk, October 6–7, 2021]. Ul'yanovsk: Ul'yanovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2021, pp. 14–18. EDN ANWXBG.

4. Gorbunov, V.A., Lonshakov, N.A., Dunaev, V.A. *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii teplomekhanicheskogo oborudovaniya AES* [Improving the operating efficiency of thermal-mechanical equipment at NPPs]. *Trudy VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi»*, Ivanovo, 9–13 noyabrya 2015 goda. T. 2 [Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference "Electric Power Industry through the Eyes of Youth", Ivanovo, November 9–13, 2015. Vol. 2]. Ivanovo, 2015, pp. 335–338. EDN WASQHB.

5. Kiselev, V.G., Kalyutik, A.A., Kukolev, M.I. *Metalloemkost' teplovykh mashin i teploemkost' ikh rabocheho tela* [Metal consumption of heat engines and heat capacity of their working fluid]. *Problemy regional'noy energetiki*, 2020, no. 2(46), pp. 53–64. DOI: 10.5281/zenodo.3898237. EDN GRGKIG.

6. Agapov, D.S., Kartoshkin, A.P., Kalyutik, A.A., Kondrashov, A.V. *Sovershenstvovanie pinch-tekhnologii dlya vozmozhnosti integratsii nestatsionarnykh teplovykh protsessov s uchetom ikh lokalizatsii* [Improving pinch technology to integrate non-stationary thermal processes taking into account their localization]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2023, vol. 25, no. 5, pp. 115–125. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-5-115-125.

7. Brodyanskiy, V.M., Fratscher, V., Mikhalek, K. *Eksergeticheskiy metod i ego prilozheniya* [Exergy Method and Its Applications]. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 288 p.

8. Tsatsaronis, D. *Vzaimodeystvie termodinamiki i ekonomiki dlya minimizatsii stoimosti energosberegayushchey sistemy* [Interaction of Thermodynamics and Economics to Minimize the Cost of an Energy-Saving System]. Odessa: Studiia «Negotsiant», 2002, p. 152.

9. Lukanin, P.V. *Otsenka energeticheskoy effektivnosti proizvodstva sul'fatnoy tsellyulozy metodom prirashcheniya eksergiy* [Assessment of the energy efficiency of sulfate pulp production using the exergy increment method]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 3–11. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-2-3-11. EDN WOZNTV.

10. Belinskaia, I., Agapov, D. *Parametric Optimization of Energy Conversion Systems Based on Thermo-Economic Indicators*. Proceedings "Engineering for Rural Development", Jelgava, 25–27 May 2016. Vol. 15. Jelgava: Latvian University of Agriculture, 2016, pp. 274–277. EDN WPFVQF.

УДК 621.187

Андрей Борисович Ларин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-32, e-mail: yaandy_81@mail.ru

Борис Михайлович Ларин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-32

Елена Геннадьевна Ухалова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-32, e-mail: lena.uxalova@mail.ru

Максим Павлович Савинов

АНО ДПО «Техническая академия Росатома», инженер по подготовке персонала атомных станций, Россия, Нововоронеж, телефон (473) 649-20-72, e-mail: max_savinov37@mail.ru

Ксения Владимировна Зотова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», ассистент кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-32, e-mail: mikhaylova.ksyu@bk.ru

Станислав Викторович Киет

ООО «НПП ТЕХНОПРИБОР», кандидат технических наук, заместитель генерального директора, Россия, Москва, e-mail: s.kiet@tehnopribor.ru

Расчетно-теоретическое обоснование определения концентрации углекислоты в паре энергетических котлов и парогенераторов

Авторское резюме

Состояние вопроса. Присутствие углекислоты в паре энергетических котлов ведет к повышению коррозионной активности конденсата и характеризуется увеличением удельной электропроводности Н-катионированной пробы, не редко сверх нормативных значений. Химический анализ проб конденсата пара на содержание углекислоты затруднен ввиду малых значений ее концентрации. Удаление углекислоты из пробы конденсата путем дегазации позволяет измерить концентрацию солевых примесей, что является важным показателем, нормируется практически для всех энергетических котлов и может быть представлено значением удельной электропроводности дегазированной пробы.

Материалы и методы. Математические модели для расчета удельной электропроводности дегазированной пробы и концентрации угольной кислоты составлены на основе уравнений из теории растворов электролитов. Используются ранее полученные выражения для расчета концентраций примесей на основе измерения удельной электропроводности прямой и Н-катионированной пробы и pH охлажденных проб.

Результаты. Представлен теоретический метод расчетного определения ряда основных (нормируемых и диагностических) показателей качества пара энергетических котлов, включая концентрацию углекислоты и значение удельной электропроводности дегазированной пробы. Для сравнения расчетных и измеренных концентраций углекислоты выполнены лабораторные исследования предельно разбавленных модельных растворов углекислоты. Показана возможность оценки достоверности расчетных значений концентраций углекислоты в пробе конденсата путем экспериментальных исследований потока углекислотного буферного раствора при использовании промышленного анализатора «Лидер-АПК» «НПП Техноприбор» (г. Москва). Приведен пример определения концентрации углекислоты в потоке буферного раствора по расчетной методике. Проведено сравнение расчетных данных с фактическим содержанием углекислоты в пробе.

Выводы. Представленный метод определения содержания углекислоты, включающий в себя методики расчета концентраций солевых компонентов: хлоридов и гидрокарбонатов натрия и удельной электропроводности дегазированной пробы, может использоваться для оперативных расчетов при измерении в охлажденных пробах удельной электропроводности (χ и χ_n) и pH с учетом методики расчета концентраций примесей, а также для создания на базе «Лидер-АПК» нового анализатора качества питательной воды, пара и конденсата энергетических котлов и парогенераторов.

Ключевые слова: паровые энергетические котлы, парогенераторы, удельная электропроводность, дегазация пробы, углекислотный буферный раствор

Andrey Borisovich Larin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-32, e-mail: yaandy_81@mail.ru

Boris Mikhailovich Larin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-32

Elena Gennadiyevna Ukhlova

Ivanovo State Power Engineering University, Senior lecturer of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-32, e-mail: lena.uxlova@mail.ru

Maxim Pavlovich Savinov

ANO DPO "Technical Academy of Rosatom", Engineer for training personnel at nuclear power plants, Russia, Novovoronezh, telephone (473) 649-20-72, e-mail: max_savinov37@mail.ru

Kseniya Vladimirovna Zotova

Ivanovo State Power Engineering University, Teaching Assistant of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-32, e-mail: mikhaylova.ksyu@bk.ru

Stanislav Viktorovich Kiet

LLC "NPP TECHNOPRIBOR", Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Deputy General Director, Russia, Moscow, e-mail: s.kiet@tehnopribor.ru

Computational and theoretical justification to determine the concentration of carbon dioxide in the steam of power boilers and steam generators

Abstract

Background. The presence of carbon dioxide in the steam of power boilers increases the corrosive activity of condensate and is characterized by an increase of the specific electrical conductivity of the H⁺ cationic sample, often above the standard values. Chemical analysis of steam condensate samples for carbon dioxide content is difficult due to small values of its concentration. The removal of carbon dioxide from the condensate sample by degassing makes it possible to measure the concentration of salt impurities, which is an important indicator. It is standardized for almost all power boilers and can be represented by the value of the specific electrical conductivity of the degassed sample.

Materials and methods. Mathematical models to calculate the specific electrical conductivity of a degassed sample and the concentration of carbonic acid are based on equations of the theory of electrolyte solutions. Previously obtained expressions have been used to calculate the concentrations of impurities based on measurements of the specific electrical conductivity of direct and H⁺ cationic samples, and pH in cooled samples.

Results. This paper presents a theoretical method to calculate the determination of a number of basic (standardized and diagnostic) quality indicators of steam of power boilers, including the concentration of carbon dioxide and the value of the specific electrical conductivity of the degassed sample. To compare calculated and measured concentrations of carbon dioxide, laboratory studies of extremely dilute model solutions of carbon dioxide have been carried out. The authors have shown the possibility to assess the reliability of calculated values of carbon dioxide concentrations in a condensate sample by experimental studies of the flow of carbon dioxide buffer solution using the industrial analyzer "Lider-APK" of "NPP Technopribor" (Moscow). An example to determine the concentration of carbon dioxide in a flow of the buffer solution using a calculation method is given. A comparison of the calculated data and the actual carbon dioxide content in the sample has been carried out.

Conclusions. The presented method to determine the carbon dioxide content includes methods to calculate the concentrations of salt components: chlorides and sodium sodium hydrogen carbonate and the specific electrical conductivity of a degassed sample. The presented method can be used for operational calculations when measuring specific electrical conductivity (χ and χ_H) and pH in cooled samples, as well as for creation of a new analyzer of the quality of feed water, steam and condensate of power boilers and steam generators on the basis of "Lider-APK".

Key words: steam power boilers, steam generators, carbon dioxide concentration in steam, calculation method for sample degassing

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.010-016

Введение. Коррозия подогревателей и испарительных поверхностей парогазовых установок (ПГУ) часто связана с содержанием в конденсате пара растворенной угольной кислоты в расчете на CO₂ [1, 2]. Угольная кислота может быть в значительной степени устранена за

счет уменьшения количества свободной угольной кислоты в паре, отвода неконденсирующихся газов из парового пространства подогревателей и испарителей; обработки питательной воды аммиаком. Концентрации примесей пара, включая расчетное определение pH, концентрации

подщелачивающего агента, углекислоты и соле-содержания могут быть определены путем измерения удельной электропроводности (УЭП) прямой и Н-катионированной пробы (χ и $\chi_{\text{Н}}$) и pH охлажденных проточных проб по методике, изложенной в [3]. Еще одним способом использования измерений электропроводности и pH является расчетное определение концентраций углекислоты и удельной электропроводности дегазированной пробы конденсата пара ($\chi_{\text{Н,д}}$). Такая задача особенно актуальна для энергоблоков ПГУ малой и средней мощности (до 150 МВт) в связи с высоким содержанием углекислоты в их питательной воде и паре, увеличивающим сверх нормативного значения удельную электропроводность Н-катионированной пробы. Наблюдается ухудшение качества пара энерготехнологических котлов с давлением 4 МПа и менее, где концентрация углекислоты может достигать значений 2000 мкг/дм³ и более¹. В связи с этим важной задачей организации химического контроля на ТЭС на основе измерения электропроводности становится определение концентрации коррозионно-опасной углекислоты и истинного солесодержания пара по величине $\chi_{\text{Н,д}}$. Применявшаяся ранее диаграмма Мостофина, изображенная на рис. 1, позволяет определить концентрацию углекислоты и значение УЭП по измеренной концентрации аммиака либо концентрации углекислоты и аммиака по измеренным значениям УЭП (χ^{25}) и pH [4, 5].

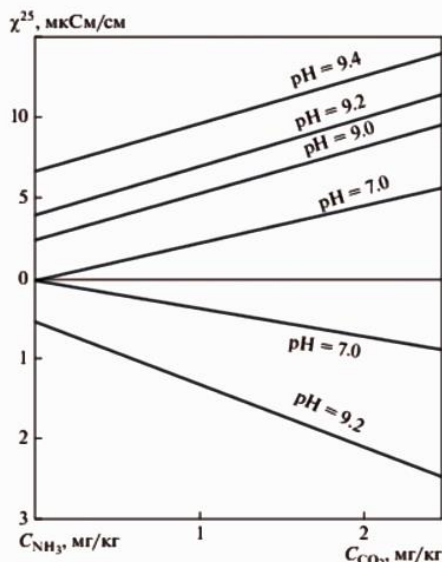


Рис. 1. Удельная электропроводность и значения pH водных растворов $\text{NH}_3 + \text{CO}_2$ при $T = 298 \text{ K}$

Однако значение УЭП в данном случае определяется только по содержанию аммиака и

углекислоты и не учитывает присутствия в пробе конденсата пара растворенных солей (рис. 1). Это дает значительную ошибку в определении концентрации CO_2 , особенно для котлов-утилизаторов и энергетических котлов среднего и низкого давлений, и не может применяться в системах химико-технологического мониторинга. Возможность расчетного определения ионных примесей водного теплоносителя по измерениям электропроводности и pH в охлажденных потоках проб дает основание для создания нового автоматического анализатора качества воды и пара.

Методы исследования. Целью настоящего исследования является разработка расчетного метода для оперативного химического контроля с использованием промышленного автоматического анализатора качества пара, конденсата и питательной воды паровых котлов, котлов-утилизаторов ПГУ и технологических котлов промышленных предприятий широкого диапазона рабочих параметров. При этом решаются следующие задачи.

1. Разработка методики расчета концентраций примесей конденсата пара и питательной воды, включая концентрацию углекислоты и УЭП дегазированной пробы, для паровых котлов и парогенераторов в широком диапазоне их теплотехнических параметров и для разного качества добавочной воды.

2. Проведение лабораторно-стендовых исследований достоверности расчетной методики. В этом случае дегазации подвергается Н-катионированная проба, поскольку в фильтрате после Н-колонки образуется слабокислая среда, что способствует переводу углекислоты из ионной формы в молекулярную (на 50–80 %), а также исключению влияния на электропроводность растворенных солей и растворенного аммиака. Дегазацию предполагается проводить барботажом (продуванием) азотом или вакуумированием (вскипанием) при доле остаточной свободной углекислоты $K = 0,01 \div 0,50$. При этом концентрация свободной углекислоты в дегазированной пробе рассчитывается по формуле

$$[\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{Н,д}} = (0,01 \div 0,50) \cdot [\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{Н}}, \quad (1)$$

где $[\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{Н}}$ – концентрация свободной углекислоты в Н-катионированной пробе до дегазации.

3. Разработка алгоритма и программного продукта, реализующего расчетную методику определения качества пара и конденсата паровых котлов и котлов-утилизаторов ПГУ среднего, высокого и сверхвысокого давлений в пределах реальных границ измеряемых параметров.

Новая расчетная методика основана на разработанной математической модели ионных

¹ РД 24.032.01-91. «Методические указания. Нормы качества питательной воды и пара, организации ВХР и ХК паровых стационарных котлов-утилизаторов и энерготехнологических котлов. Допустимые значения параметров»; СТО 70238424.27.100.013-2009. Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС. Условие создания. Нормы и требования. Стандарт организации. – М.: НП «ИнВЭЛ», 2009.

равновесий, представленной в [3]. Расчет УЭП, pH и концентрации уголекислоты в дегазированной пробе выполняется после получения результатов расчета показателей качества пара и конденсата до дегазации по методике [6], где определяются следующие величины: эмпирический параметр n , равный отношению $\frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{H}}}{[\text{Cl}^-]_{\text{H}}}$;

концентрации в мкг/дм³: $[\text{Cl}^-]$; $[\text{Na}^+]$; $[\text{NH}_3]$; $\sum \text{CO}_2$; солесодержание в пересчете на концентрацию NaCl.

Порядок расчета. Расчет производится в несколько этапов.

1. *Расчет концентраций ионных примесей Н-катионированной пробы до дегазации (моль/дм³ или М):*

$$[\text{HCO}_3^-]_{\text{H}} = n \cdot [\text{Cl}^-], \quad (2)$$

где $[\text{Cl}^-]$, n – определяются по методике [6];

$$[\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{H}} = \frac{\sum \text{CO}_2}{44} \cdot 10^{-6} - [\text{HCO}_3^-]_{\text{H}}, \quad (3)$$

где $\sum \text{CO}_2$ – суммарная концентрация форм уголекислоты, мкг/дм³;

$$[\text{H}^+]_{\text{H}} = \frac{4,5 \cdot 10^{-7} [\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{H}}}{[\text{HCO}_3^-]_{\text{H}}}, \text{ моль/дм}^3; \quad (4)$$

$$\text{pH}_{\text{расч}} = -\lg[\text{H}^+]_{\text{H}}; \quad (5)$$

2. *Расчет концентраций примесей после дегазации*

– сдвиг уголекислотного равновесия после дегазации:

$$X = B - \sqrt{B^2 - \left([\text{H}^+]_{\text{H}} [\text{HCO}_3^-]_{\text{H}} - 4,5 \cdot 10^{-7} [\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{H}} \cdot K \right)}, \quad (6)$$

где $B = 0,5([\text{HCO}_3^-]_{\text{H}} + [\text{H}^+]_{\text{H}} + 4,5 \cdot 10^{-7})$; X – сдвиг уголекислотного равновесия, моль/дм³, $0 < X < [\text{H}^+]_{\text{H}}$ согласно реакции



– концентрации ионов после дегазации:

$$[\text{H}^+]_{\text{д}} = [\text{H}^+]_{\text{H}} - X; \quad (7)$$

$$\text{pH}_{\text{д}} = -\lg[\text{H}^+]_{\text{д}}; \quad (8)$$

$$[\text{Cl}^-]_{\text{д}} = [\text{Cl}^-]_{\text{H}}; \quad (9)$$

$$[\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{д}} = (K \cdot [\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{H}} + X); \quad (10)$$

$$[\text{HCO}_3^-]_{\text{д}} = ([\text{HCO}_3^-]_{\text{H}} - X); \quad (11)$$

– суммарная концентрация форм уголекислоты, мкг/дм³:

$$[\sum \text{CO}_2]_{\text{д}} = ([\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{д}} + [\text{HCO}_3^-]_{\text{д}}) \cdot 10^6 \cdot 44; \quad (12)$$

3. *Расчет удельной электропроводности дегазированной пробы (выполняется по программе [7]).*

4. *Вывод результатов расчета:*

$$\text{pH}_{\text{д}}, [\sum \text{CO}_2]_{\text{д}}, \chi_{\text{H,д}}.$$

Теоретические результаты исследований. Для обоснования правильности результатов расчета концентрации уголекислоты необходимо сравнить расчетные и измеренные значения для реального энергетического объекта.

Пример 1. Расчет концентрации уголекислоты и удельной электропроводности дегазированной пробы конденсата пара барабана высокого давления ПГУ-110 ($\chi_{\text{H,д}}$) на примере Прегольской ТЭС (энергоблок №2, данные по АХК за 2022 год).

Измеренные значения удельной электропроводности прямой χ и Н-катионированной χ_{H} проб и значения pH составили:

$$\chi = 3,4 \text{ мкСм/см}; \chi_{\text{H}} = 0,73; \text{pH} = 9,05.$$

Расчет по программе [6] дает следующие значения: $n = 1$; $[\text{Cl}^-] = 0,89 \text{ мкМ}$;

$$[\text{HCO}_3^-] = 4,27 \text{ мкМ}; \text{pH} = 9,02;$$

$$[\text{NH}_3] = 410 \text{ мкг/дм}^3; \sum \text{CO}_2 = 188 \text{ мкг/дм}^3.$$

Последовательность расчета следующая:

1. *Расчет концентраций примесей в фильтрате Н-колони (моль/дм³, или М):*

$$[\text{Cl}^-]_{\text{H}} = 0,89 \cdot 10^{-6}; [\text{HCO}_3^-]_{\text{H}} = 0,89 \cdot 10^{-6};$$

$$[\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{H}} = 3,38 \cdot 10^{-6} \text{ М};$$

$$[\text{H}^+]_{\text{H}} = 1,69 \cdot 10^{-6} \text{ М}; \text{pH}_{\text{H}} = 5,77.$$

2. *Расчет сдвига уголекислотного равновесия X по (6). Принимаем $K = 0,1$, тогда*

$$B = 1,515 \cdot 10^{-6} \text{ М}; X = 0,352 \cdot 10^{-6} \text{ М}.$$

3. *Расчет концентраций ионных примесей после дегазации пробы:*

$$[\text{H}^+]_{\text{д}} = [\text{H}^+]_{\text{H}} - X = 1,34 \cdot 10^{-6} \text{ М}; \text{pH}_{\text{д}} = 5,87;$$

$$[\text{Cl}^-]_{\text{д}} = 0,89 \cdot 10^{-6} \text{ М}; [\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{д}} = 0,69 \cdot 10^{-6} \text{ М};$$

$$[\text{HCO}_3^-]_{\text{д}} = 0,54 \cdot 10^{-6} \text{ М};$$

$$[\sum \text{CO}_2]_{\text{д}} = ([\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{д}} + [\text{HCO}_3^-]_{\text{д}}) \cdot 10^6 \cdot 44 = 54,0 \text{ мкг/л}.$$

4. Расчет удельной электропроводности дегазированной пробы:

$$\chi_{Н,д} = 3,498 \cdot 10^5 \cdot 1,34 \cdot 10^{-6} + 7,64 \cdot 10^4 \cdot 0,89 \cdot 10^{-6} + 4,5 \cdot 10^4 \cdot 0,54 \cdot 10^{-6} = 0,53 \text{ мкСм/см.}$$

Пример 2. То же условие, что и в примере 1, но при $K = 0,01$.

Тогда в размерности величин по примеру 1 получим:

$$X = 0,709 \cdot 10^{-6} \text{ М;}$$

$$[H^+]_д = 9,81 \cdot 10^{-7} \text{ М;}$$

$$pH_д = 6,01;$$

$$[Cl^-]_д = 0,89 \cdot 10^{-6} \text{ М;}$$

$$[H_2CO_3]_д = 0,743 \cdot 10^{-6} \text{ М;}$$

$$[HCO_3^-]_д = 0,181 \cdot 10^{-6} \text{ М;}$$

$$\chi_{Н,д} = 3,498 \cdot 10^5 \cdot 9,81 \cdot 10^{-7} + 7,64 \cdot 10^4 \cdot 0,89 \cdot 10^{-6} + 4,5 \cdot 10^4 \cdot 0,181 \cdot 10^{-6} = 0,42 \text{ мкСм/см.}$$

Сравнение результатов расчета по примерам 1 и 2 показывает, что при повышении эффекта дегазации, выражаемого уменьшением K от 0,1 (пример 1) до 0,01 (пример 2), расчетное значение удельной электропроводности дегазированной пробы уменьшается от 0,53 до 0,42 мкСм/см. При норме показателя «удельная электропроводность Н-катионированной пробы» $\chi_{Н,д} = 0,5 \text{ мкСм/см}$

нормативное значение дегазированной пробы достигается лишь при значении $K = 0,01$.

Таким образом могут быть рассчитаны концентрации ионных примесей и уголекислоты в конденсированной пробе пара энергетического котла по измерениям χ , χ_n и pH, реализуемым автоматическим анализатором «Лидер-АПК» НПП «Техноприбор» (г. Москва). Методика расчета положена в основу программы для ЭВМ [7] и может использоваться для решения широкого круга задач по оценке качества пара, а также для разработки промышленного анализатора непрерывного действия. В этом случае требуется проведение стендовых исследований по оценке достоверности расчетной методики.

Опытные результаты исследований.

Ввиду сложности аналитического измерения концентрации уголекислоты в предельно разбавленных растворах, достоверность определения ее концентрации в пробе конденсата пара может быть достигнута экспериментально-расчетным методом на базе анализатора «Лидер-АПК» при известной концентрации уголекислоты в пробе. Для этого была использована лабораторная установка (рис. 2) и уголекислотный буферный раствор, содержащий в равных концентрациях гидрокарбонат натрия, хлорид натрия и угольную кислоту. Такой раствор принят для калибровки анализатора «Лидер-АПК» по измерению pH [8]. В данном случае решается задача сравнения расчетного значения концентрации уголекислоты, полученного по представленной выше методике, с фактическим значением согласно условию приготовления раствора.

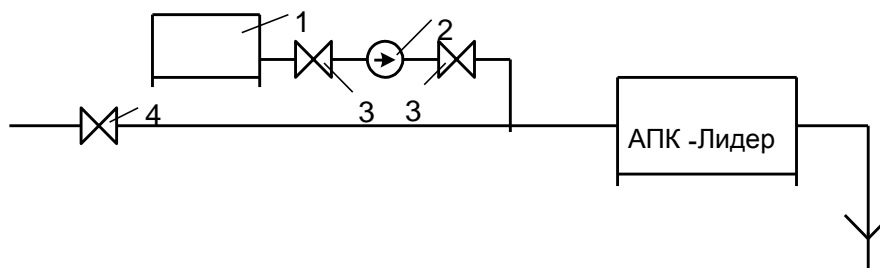


Рис. 2. Схема установки для калибровки «Лидер-АПК» по pH: 1 – бак с калибровочным раствором ($V = 2 \text{ л}$); 2 – микронасос-дозатор ($Q = 1\text{--}2 \text{ л/ч}$); 3 – краны на линии подачи калибровочного раствора; 4 – кран на линии потока пробы

Согласно нормам² и правилам эксплуатации приборов автоматического химического контроля качества водного теплоносителя на ТЭС, калибровка производится в потоке пробы воды при следующих показателях:

- расход пробы $30 \pm 5 \text{ л/ч}$;
- температура пробы $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$;
- расход калибровочного раствора $1 \pm 0,1 \text{ л/ч}$;
- удельная электропроводность пробы

$$\chi^{25} \leq 0,5 \text{ мкСм/см.}$$

Рабочий диапазон анализатора «Лидер-АПК» по pH – в пределах от 6,0 до 10,0 ед. pH, по удельной электропроводности – от 0,06 до 10,0 мкСм/см. Удельная электропроводность потока буферного раствора (рис. 2, линия крана 4) должна иметь значение не более 0,3 мкСм/см. Раствор готовится непосредственно перед операцией калибровки по приведенной ниже методике.

В [8] описан способ калибровки анализатора «Лидер-АПК» по pH с применением уголекислотного буферного раствора, содержащего

² СТО 70238424.27.100.013-2009. Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС. Условие создания. Нормы и требования. Стандарт организации. – М.: НП «ИнВЭЛ», 2009.

NaHCO_3 , H_2CO_3 и NaCl при соотношении концентраций 1:1:1. В этом случае в диапазоне концентраций $3 \cdot 10^{-6} \div 3 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³, соответствующим значениям удельной электропроводности потока контролируемой пробы $1 \div 10$ мкСм/см, значение pH изменяется от 6,38 до 6,31, т.е. является малоизменяемым и пригодным для калибровки анализатора (или другого pH-метра, работающего на сверхчистых водных средах типа конденсата и питательной воды). Измеряя УЭП калибровочного углекислотного буферного раствора и зная его pH и концентрацию углекислоты, по уравнениям, приведенным ниже, определяется расчетная концентрация угольной кислоты по измеренному значению УЭП, после чего полученное значение сравнивается с заведомо известным значением концентрации углекислоты.

Порядок операций включает следующие шаги:

1) бачок заполняется калибровочным раствором;

2) поток пробы воды подается на датчики χ и χ_{H} с пропуском через H-колонку на анализаторе «Лидер-АПК» и проверяются характеристики пробы воды на соответствие требованиям;

3) включается насос-дозатор и устанавливается расход калибровочного раствора в соответствии с требованиями.

Измеренное значение удельной электропроводности (χ , мкСм/см) прямой пробы углекислотного буферного раствора, приведенное к 25 °С, используется для расчета концентрации свободной, или равновесной, концентрации углекислоты $[\text{H}_2\text{CO}_3]$ в мкМ (10^{-6} моль/дм³):

$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = 4,523 \cdot \chi - 1,244, \quad (13)$$

или в расчете на концентрацию CO_2 (мкг/дм³):

$$[\text{CO}_2] = 199 \cdot \chi - 54,7, \text{ мкг/дм}^3. \quad (14)$$

Суммарная концентрация (ΣCO_2) свободной и связанной углекислоты в пробе буферного раствора, мкМ (10^{-6} моль/дм³), рассчитывается по уравнению

$$\Sigma \text{CO}_2 = [\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{HCO}_3^-] = 9,05 \cdot \chi - 1,59, \quad (15)$$

или в расчете на концентрацию CO_2 (мкг/дм³):

$$\Sigma \text{CO}_2 = 398 \cdot \chi - 70. \quad (16)$$

Представленные выражения получены в результате решения уравнения электропроводности:

$$1000 \cdot \chi = 349,8 \cdot 10^{-\text{pH}} + 50,1 \cdot [\text{Na}^+] + 76,4 \cdot [\text{Cl}^-] + 44,5 \cdot [\text{HCO}_3^-], \quad (17)$$

где $[\text{Cl}^-]$ – концентрация хлоридов, мкМ:

$$[\text{Cl}^-] = 4,523 \cdot \chi - 1,783 \cdot 10^{-\text{pH}}. \quad (18)$$

Тогда

$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = 4,523 \cdot \chi - 2,783 \cdot 10^{-\text{pH}}, \text{ мкМ}. \quad (19)$$

При теоретическом значении pH буферного раствора 6,35 получим:

$$[\text{Cl}^-] = 4,523 \cdot \chi - 0,797 \text{ мкМ} (10^{-6} \text{ моль/дм}^3) \quad (20)$$

при условии измерения удельной электропроводности χ в мкСм/см в буферном растворе, где:

$$[\text{Na}^+] = 2 \cdot [\text{Cl}^-]; [\text{HCO}_3^-] = [\text{Cl}^-] + [\text{H}^+]; \quad (21)$$

$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = [\text{Cl}^-] - [\text{H}^+]; \quad (22)$$

pH = 6,35.

Пример 3. Углекислотный буферный раствор приготовлен по приведенной выше методике и содержит

$$[\text{NaHCO}_3] = [\text{NaCl}] = [\text{H}_2\text{CO}_3] = 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ моль/дм}^3.$$

Измеренные анализатором «Лидер-АПК» значения удельной электропроводности и pH, приведенные к 25 °С, составили: $\chi = 0,92$ мкСм/см; $\chi_{\text{H}} = 1,73$ мкСм/см; pH = 6,38.

Расчет по представленным выше выражениям дает следующие результаты:

$$[\text{Cl}^-] = 4,523 \cdot 0,92 - 0,797 \text{ мкМ}$$

(или $10^{-6} \cdot 3,36$ моль/дм³);

$$\Sigma \text{CO}_2 = 9,05 \cdot 0,92 - 1,59 = 6,73 \text{ мкМ}$$

(или $\Sigma \text{CO}_2 = 398 \cdot 0,92 - 70 = 296,2$ мкг/дм³).

В результате расчета по изложенному выше алгоритму получаем: $[\text{Cl}^-] = 3,42$ мкМ;

$[\text{HCO}_3^-] = 3,56$ мкМ; $\Sigma \text{CO}_2 = 6,86$ мкМ или 301,7 мкг/дм³; pH = 6,31.

Имея в виду, что алгоритм на базе анализатора «Лидер-АПК» предусматривает итерационный характер вычислений с остановкой расчета при разности значений pH $\Delta \text{pH} = |\text{pH}_{\text{расч}} - \text{pH}_{\text{изм}}| < 0,1$, можно отметить, что полученный результат расчета ΣCO_2 по алгоритму на базе анализатора «Лидер-АПК» отличается от фактического значения ΣCO_2 буферного раствора менее чем на 10 % и может считаться приемлемым для оперативного химического контроля качества пара энергетических котлов.

Опытным путем показано, что изменение концентрации буферного раствора не влияет существенно на результат определения концентрации CO_2 . Расхождение между фактическими и расчетными значениями концентрации углекислоты составляет ошибку методики и определяется отклонениями в дозировке рабочего рас-

твора, в ошибках измерений, а также определяется итерационной методикой расчета. Предложенный расчетный метод может использоваться для калибровки нового анализатора по величине концентрации углекислоты.

Выводы. Таким образом, предложенный метод расчетного определения ряда нормируемых и диагностических показателей качества пара энергетических котлов, включая концентрацию углекислоты и удельную электропроводность дегазированной пробы, помог решить следующие задачи:

1. Разработана методика расчета концентраций солевых компонентов: хлоридов и гидрокарбонатов натрия, концентрации углекислоты и удельной электропроводности дегазированной пробы на базе измерений удельной электропроводности (χ и χ_H) и pH конденсированных и проточных проб пара.

2. Проведены лабораторно-стендовые исследования достоверности расчетной методики с использованием углекислотного буферного раствора, разработанного применительно к условиям конденсата пара энергетических установок, показавшие адекватность расчетных концентраций углекислоты их фактическим значениям в пределах 10 %-го отклонения.

3. Подготовлена программа [7] и предложена разработка нового анализатора качества питательной воды и пара с использованием расчетного метода на базе предыдущей разработки анализатора «Лидер-АПК».

Список литературы

1. Воронов В.Н., Петрова Т.И. Водно-химические режимы ТЭС и АЭС. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. – 240 с.
2. Богачев А.Ф., Радин Ю.А., Герасименко О.Б. Особенности эксплуатации и повреждаемость котлов-утилизаторов бинарных парогазовых установок. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 232 с.
3. Ларин Б.М., Ларин А.Б., Савинов М.П. Расчетное определение качества пара энергетических котлов по измерению удельной электрической проводимости и pH // Теплоэнергетика. – 2021. – № 5. – С. 63–71.
4. Мостофин А.А. Расчет значений pH и удельной электропроводности водных растворов NH_3 и CO_2 // Водоподготовка, водный режим и химконтроль на паросиловых установках. Вып. 2. – М.; Л.: Энергия, 1966. – С. 178–187.
5. Мостофин А.А. Влияние температуры на определения pH и CO_2 в питательной воде прямоточных парогенераторов // Водоподготовка, водный режим и химконтроль на паросиловых установках. Вып. 6. – М.: Энергия, 1978. – С. 195–199.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663182 Российская Федерация. Программа для определения показателей качества пара энергетических котлов и парогенераторов по измерению удельной электропроводности и pH конденсированной пробы / Б.М. Ларин,

А.Б. Ларин, Е.Н. Бушуев, М.П. Савинов; опубл. 12.08.2021, Бюл. № 8.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680268 Российская Федерация. Программа расчета удельной электропроводности дегазированной пробы конденсата водяного пара / А.Б. Ларин, Е.Н. Бушуев, С.В. Кийет, М.П. Савинов; опубл. 28.10.2022, Бюл. № 11.

8. Пат. РФ на изобретение № 2659333. Способ калибровки pH-метров / Б.М. Ларин, А.Б. Ларин, В.Г. Кийет, С.В. Кийет, заявка от 14.07.2017; опубл. 29.06.2018, Бюл. №19.

References

1. Voronov, V.N., Petrova, T.I. *Vodno-khimicheskie rezhimy TES i AES* [Water-chemical modes of thermal power plants and nuclear power plants]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2009. 240 p.
2. Bogachev, A.F., Radin, Yu.A., Gerasimenko, O.B. *Osobennosti ekspluatatsii i povrezhdaemost' kotlov–utilizatorov binarnykh parogazovykh ustanovok* [Features of operation and damage to recovery boilers of binary combined-cycle gas installations]. Moscow: Energoatomizdat, 2008. 232 p.
3. Larin, B.M., Larin, A.B., Savinov, M.P. *Teploenergetika*, 2021, no. 5, pp. 63–71.
4. Mostofin, A.A. Raschet znacheniy pH i udel'noy elektroprovodnosti vodnykh rastvorov NH_3 i CO_2 [Calculation of pH values and specific electrical conductivity of aqueous solutions NH_3 and CO_2]. *Vodopodgotovka, vodnyy rezhim i khimkontrol' na parosilovykh ustanovkakh*. Vyp. 2 [Water treatment, water regime and chemical control at steam power plants. Issue 2]. Moscow; Leningrad: Energiya, 1966, pp. 178–187.
5. Mostofin, A.A. Vliyaniye temperatury na opredeleniya pH i CO_2 v pitatel'noy vode pryamotchnykh parogeneratorov [Influence of temperature on the determination of pH and CO_2 in feed water of direct-flow steam generators]. *Vodopodgotovka, vodnyy rezhim i khimkontrol' na parosilovykh ustanovkakh*. Vyp. 6 [Water treatment, water regime and chemical control at steam power plants. Issue 6]. Moscow: Energiya, 1978, pp. 195–199.
6. Larin, B.M., Larin, A.B., Bushuyev, E.N., Savinov, M.P. *Programma dlya opredeleniya pokazateley kachestva para energeticheskikh kotlov i parogeneratorov po izmereniyu udel'noy elektroprovodnosti i pH kondensirovannoy proby* [A program for determining steam quality indicators of power boilers and steam generators by measuring the electrical conductivity and pH of a condensed sample]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM v RF* [Certificate of state registration of computer program in Russian Federation]. No. 2021663182, 2021.
7. Larin, A.B., Bushuyev, E.N., Kiyet, S.V., Savinov, M.P. *Programma rascheta udel'noy elektroprovodnosti degazirovannoy proby kondensata vodyanogo para* [Program for calculating the electrical conductivity of a degassed sample of water vapor condensate]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM v RF* [Certificate of state registration of computer program in Russian Federation]. No. 2022680268, 2022.
8. Larin, B.M., Larin, A.B., Kiyet, V.G., Kiyet, S.V. *Sposob kalibrovki pH-metrov* [pH meter calibration method]. Patent RF, no. 2659333, 2018.

УДК 628.165

Мария Владимировна Козлова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Александр Васильевич Банников

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: avbannikov_pte@mail.ru

Владимир Владимирович Смирнов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: smirnovww@mail.ru

Роман Дмитриевич Семяшкин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент, Россия, Иваново, e-mail: roman.semyashkin@mail.ru

Перспективы использования низкопотенциальных источников энергии в системах опреснения на базе газоконтактных установок

Авторское резюме

Состояние вопроса. Низкопотенциальные вторичные энергетические ресурсы, к которым относятся жидкости с температурой менее 150 °С и газы с температурой ниже 300 °С, составляют большую часть всех видов тепловых вторичных энергетических ресурсов. Использование вторичных энергетических ресурсов в различных процессах позволяет снизить потребление органического топлива и, как следствие, количество выбросов, поступающих в атмосферу и оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. Поскольку в термических опреснительных установках около 40–50 % от стоимости обессоленной воды составляют затраты на тепловую энергию, то для ее снижения целесообразно использование низкопотенциальных источников энергии. Актуальным является использование низкопотенциальных источников энергии в газоконтактных опреснительных установках, поскольку процесс испарения воды в них может осуществляться при температурах ниже температуры насыщения. Кроме этого, в установках данного типа возможна непосредственная утилизация газообразных вторичных энергетических ресурсов, например продуктов сгорания, использование которых позволяет не только получать пресную воду, пригодную для технических нужд, но и осуществлять очистку дымовых газов. В зависимости от требований, предъявляемых к опресняемой воде, а также параметров и вида теплоносителей может быть предложено несколько вариантов утилизации вторичных энергетических ресурсов.

Материалы и методы. Исследование проведено с использованием метода балансовых расчетов процессов теплообмена в технологических энергоустановках.

Результаты. В зависимости от вида и параметров низкопотенциальных источников энергии предложено несколько схем утилизации низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов в системах обессоливания, основанных на газоконтактных опреснительных установках. Выполнена оценка эффективности интеграции трансформаторов теплоты в тепловые схемы газоконтактных опреснительных установок для утилизации вторичных энергетических ресурсов с температурой менее 80 °С для различных рабочих тел: R600, R600a, R1234ze(Z), R142b, R717, R245fa, R134a. Для наиболее эффективных рабочих тел построены номограммы, позволяющие в зависимости от температуры вторичных энергетических ресурсов определить затраты энергии на привод компрессора, а также количество энергии, отбираемое от вторичных энергетических ресурсов. Определено требуемое количество дымовых газов для получения 1 м³ пресной воды в паровоздушных опреснительных установках в зависимости от параметров дымовых газов и условий работы.

Выводы. Установлено, что при утилизации продуктов сгорания в поверхностных теплообменниках паровоздушных опреснителей для получения 1 м³ пресной воды требуется от 1,96 до 18,47 тысяч килограмм уходящих газов в зависимости от их параметров и режима работы установки; при утилизации вторичных энергетических ресурсов с использованием трансформаторов теплоты наиболее эффективным и экологичным является использование рабочих агентов R1234ze(Z), R245fa и аммиака; утилизация низкопотенциальных источников энергии с использованием трансформаторов теплоты при температурах теплоносителя менее 24 °С является нецелесообразной.

Ключевые слова: уходящие газы, низкопотенциальные источники энергии, вторичные энергетические ресурсы, опреснительная установка, трансформаторы теплоты

Maria Vladimirovna Kozlova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Alexander Vasilyevich Bannikov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: avbannikov_pte@mail.ru

Vladimir Vladimirovich Smirnov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: smirnovww@mail.ru

Roman Dmitrievich Semyashkin

Ivanovo State Power Engineering University, Student, Russia, Ivanovo, e-mail: roman.semyashkin@mail.ru

Prospects for the use of low-potential energy sources in desalination systems based on gas-contact installations

Abstract

Background. Low-potential secondary energy resources are the majority of all types of thermal secondary energy resources. They include liquids with temperatures below 150 °C and gases with temperatures below 300 °C. The use of secondary energy resources in various processes makes it possible to reduce the consumption of organic fuels and, as a result, the number of emissions entering the atmosphere and having a negative impact on the environment. Since in thermal desalination plants about 40–50 % of the cost of desalinated water is the cost of thermal energy, it is advisable to use low-potential energy sources to reduce it. Application of low-potential secondary energy resources in gas-contact desalination plants is relevant, since the process of evaporation of water can be carried out at temperatures below the saturation temperature. In addition, direct utilization of gas secondary energy resources is possible in installations of this type, for example, combustion products. The use of combustion products allows not only to obtain fresh water suitable for technical needs, but also to purify flue gases. Several options for the utilization of secondary energy resources can be proposed depending on the requirements for desalinated water, as well as the parameters and type of heat carriers.

Materials and methods. The study has been conducted using the method of balance calculations of heat exchange processes in technological power plants.

Results. The authors have proposed several schemes for the utilization of low-potential secondary energy resources in desalination systems based on gas-contact desalination plants depending on the type and parameters of the low potential energy resources. The authors have evaluated the efficiency of the integration of heat transformers into the thermal circuits of gas-contact desalination plants for the disposal of secondary energy resources with a temperature less than 80 °C for various working agent: R600, R600a, R1234ze(Z), R142b, R717, R245fa, R134a. Nomograms have been constructed for the most efficient working agent. Depending on the temperature of secondary energy resources, it is possible to determine the energy consumption for the compressor drive, as well as the amount of energy taken from secondary energy resources. The required amount of flue gases has been determined to produce a cubic meter of fresh water in steam-air desalination plants, depending on the flue gas parameters and operating conditions.

Conclusions. It has been established that when disposing combustion products in surface heat exchangers of steam-air desalination plants, from 1,96 to 18,47 thousand kilograms of exhaust gases are required to produce 1 m³ of fresh water, depending on their parameters and the operating mode of the installation. When utilizing secondary energy resources using heat transformers, the most efficient and environmentally friendly is the use of working agents R1234ze(Z), R245fa and ammonia. Disposal of low-potential energy sources using heat transformers at temperatures of the heat carrier less than 24 °C is impractical.

Key words: exhaust gases, low-potential energy sources, secondary energy resources, desalination plant, heat transformers

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.017-027

Введение. Низкопотенциальные источники энергии (НИЭ), к которым относятся вторичные энергетические ресурсы (ВЭР) с температурой менее 150 °C для жидкостей и ниже 300 °C для газов [1] (сточные воды, вентиляционные выбросы, охлаждающая вода, дымовые газы, вода после продувки котельных агрегатов и т.д.), не получили широкого распространения в промышленности и энергетике.

Перспективным вариантом утилизации НИЭ является их применение в термических опреснительных установках, поскольку около 40–50 % от стоимости обессоленной воды в них составляют затраты на подводимую тепловую энергию [2]. Наиболее эффективным вариантом

является использование НИЭ в газоконтактных опреснительных установках, так как процесс испарения в них может осуществляться при температурах ниже температуры насыщения.

В опреснителях данного типа в качестве энергоносителя, контактирующего с морской водой, может использоваться воздух, а также дымовые газы, покидающие различные энергетические установки.

Использование уходящих газов в контактных опреснителях позволяет повысить интенсивность теплообменных процессов, протекающих в испарительной колонне, а также обеспечивает очистку продуктов сгорания от диоксида углерода, снижая выбросы парниковых

газов, однако обессоленная вода, полученная в ходе работы таких установок, может использоваться только для технических целей. Однако применение продуктов сгорания в таких установках также интенсифицирует процессы коррозии.

Известен ряд тепловых схем, в которых продукты сгорания используются в контактных колоннах в качестве греющей среды [3–6], при этом рассматриваются два пути получения обессоленной воды: путем нагрева опресняемой воды и последующим ее адиабатическим испарением, а также путем увлажнения дымовых газов и их осушкой.

Согласно исследованиям [3], при контакте морской воды с дымовыми газами, полученными в результате сжигания газового топлива, существенного изменения качества морской воды не происходит, наблюдается повышение концентрации диоксида углерода в рассоле, что свидетельствует об очистке продуктов сгорания от CO_2 , жесткость же и солесодержание изменяются в соответствии с кратностью упаривания. При использовании продуктов сгорания мазута происходит частичная нейтрализация щелочности исходной воды. Степень нейтрализации зависит от количества сернистых соединений, содержащихся в топливе. В условиях, когда сжигается сернистый мазут, общая щелочность упаренной в контактной камере морской воды снижается до 1,2–2,8 мг-экв/кг, при этом обеспечивается pH 5,5–6,2.

При работе паровоздушных опреснительных установок получаемая обессоленная вода имеет более высокое качество [7] и после минерализации может использоваться для целей питьевого водоснабжения. В таких установках низкопотенциальная теплота утилизируется в рекуперативных теплообменниках, обеспечивая испарение морской воды, ее нагрев, а также компенсацию тепловых потерь.

Кроме этого, использование НИЭ позволяет снизить негативное воздействие на окружающую среду за счет снижения выбросов, образующихся при сжигании органического топлива.

Решение задач, направленных на применение низкопотенциальных ВЭР в системах опреснения, является актуальным, так как объем таких ВЭР составляет более 60 % от суммы всех видов ВЭР [8].

Тепловые схемы газоконтактных опреснительных установок для утилизации НИЭ. Работа газоконтактных опреснительных установок включает в себя два основных процесса: увлажнение газа, требующее подвода теплоты, а также осушку парогазовой смеси, осуществляемую отводом энергии. Работа опреснителя при низких температурах увлажнения позволяет снизить интенсивность накипеобразования, а также данному обстоятельству способствует непосредственный контакт морской воды и газового потока, при котором процесс испарения происходит в объеме. То есть подвод теплоты необходимо осуществлять

в зону контакта морской воды и взаимодействующих с ней газов.

В зависимости от вида и параметров НИЭ можно предложить следующие варианты использования их потенциала:

- использование НИЭ в качестве греющей среды;
- прямое использование НИЭ в контактных установках (применительно для дымовых газов);
- использование в качестве источника теплоты в трансформаторах теплоты (ТТ), интегрированных в тепловые схемы опреснительных установок.

Выбор схемы утилизации тепловых ВЭР зависит от вида (газ, жидкость) и параметров энергоносителя.

Одним из вариантов организации контакта опресняемой воды и воздушного потока является барботаж паровоздушной смеси, который осуществляется в испарительной колонне с размещенным в ней газораспределительным устройством. При этом для более интенсивного увлажнения рекомендуется подводить тепловую энергию в зону барботажа.

Газообразные источники энергии, например продукты сгорания органического топлива, могут использоваться в качестве греющей среды в опреснителях, в которых с морской водой контактирует воздух (рис. 1). В таком случае газообразные ВЭР поступают в нагревательный элемент установки, где за счет теплообмена с находящейся в зоне барботажа морской водой они охлаждаются, а затем покидают установку.

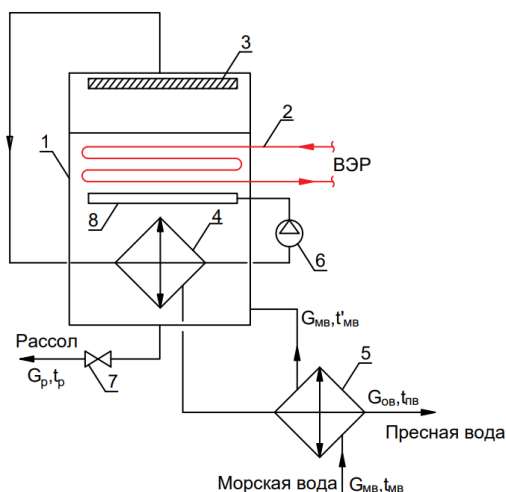


Рис. 1. Принципиальная схема газоконтактной опреснительной установки для утилизации низкопотенциальных ВЭР: 1 – испарительная колонна; 2 – теплоутилизатор; 3 – каплеотбойник; 4 – конденсатор; 5 – теплообменник; 6 – газодувка; 7 – сливной кран; 8 – газораспределительная решетка

Стоит отметить, что при охлаждении продуктов сгорания до температуры ниже точки росы в поверхностном теплообменнике возможно выпадение капельной влаги с последующим

образованием соединений, способных негативно влиять на состояние теплообменных поверхностей. Значение температуры точки росы зависит от вида и состава сжигаемого топлива. В этой связи для исключения низкотемпературной коррозии следует охлаждать дымовые газы до температуры, превышающей температуру точки росы минимум на 5–10 °С. Для продуктов сгорания природного газа значение данного параметра составляет от 52 до 60 °С, в зависимости от влажности поступающего на горение воздуха, величины избытка воздуха, а также его давления [8].

Предложенная тепловая схема (рис. 1) функционирует следующим образом. Морская вода подогревается в теплообменнике 5 за счет охлаждения пресной воды, поступающей из конденсатора 4. Затем опресняемая вода поступает в испарительную колонну 1, где подогревается до температуры барботажа. В испарительной колонне также осуществляются процессы сопряженного теплообмена между воздухом, поступающим из газораспределительной решетки 8, и морской водой, в результате чего воздух увлажняется, а также повышается его температура. Далее полученная паровоздушная смесь проходит через каплеотбойник 3 и поступает в конденсатор 4, где осушается. Сконденсировавшийся водяной пар представляет собой пресную воду, которая отправляется в теплообменник 5 для подогрева морской воды. Осушенный воздух после конденсатора газодувкой 6 вновь подается в газораспределительную решетку 8. Полученный в ходе работы установки рассол через сливной кран 7 удаляется. Догрев морской воды и компенсация тепловых потерь осуществляются за счет отводимой от ВЭР энергии в нагревателе 2.

Альтернативным вариантом утилизации теплоты уходящих газов, покидающих различные энергетические установки, является их использование в испарительных камерах, в которых осуществляется диспергирование морской воды [3, 9].

При работе установок данного типа продукты сгорания органического топлива, покидающие различные энергетические установки, могут использоваться для первоначального подогрева морской воды либо напрямую поступать в контактную испарительную колонну (рис. 2). В таком случае предварительный нагрев морской воды до температуры мокрого термометра может осуществляться за счет охлаждения образующегося концентрата. Для исключения капельного уноса в верхней части испарительной камеры устанавливается каплеотбойник.

Основным фактором, определяющим производительность газоконтактных опреснителей (рис. 2), является соотношение расходов дымовых газов и воды, поступающих в контактную камеру. Согласно исследованиям [3], наибольшая эффективность достигается при соотношении расходов опресняемой воды и дымовых газов от 0,1 до 0,4 кг обессоленной воды на 1 м³ дымовых газов.

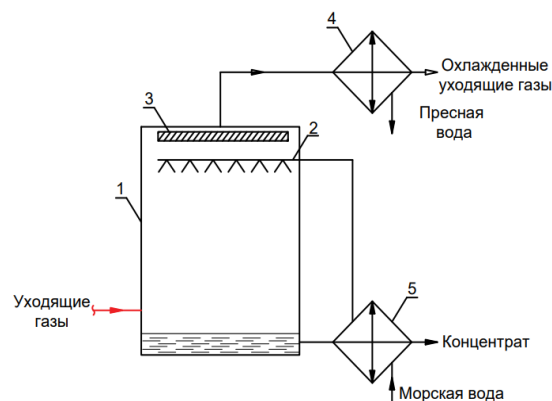


Рис. 2. Принципиальная схема газоконтактной опреснительной установки для утилизации уходящих газов: 1 – испарительная колонна; 2 – система диспергирования опресняемой воды (форсунки); 3 – каплеотбойник; 4 – конденсатор-осушитель; 5 – теплообменник

В установках данного типа продукты сгорания поступают в испарительную колонну, где диспергируется предварительно подогретая морская вода, в результате контакта с которой дымовые газы увлажняются (процесс 1–2), а затем от них отводится тепловая энергия, в результате чего происходит их осушка (процессы 2–3 (без выпадения влаги) и 3–4 (конденсация водяных паров)) (рис. 3). Реализуемый термодинамический цикл является разомкнутым, соответственно, после осушки продукты сгорания выбрасываются в атмосферу.

В основном в таких установках реализуется адиабатическое увлажнение продуктов сгорания, соответственно, возникает необходимость подогрева исходной воды перед входом в контактную камеру до температуры мокрого термометра, что требует установки поверхностных теплообменных аппаратов, в которых могут образовываться карбонатные отложения.

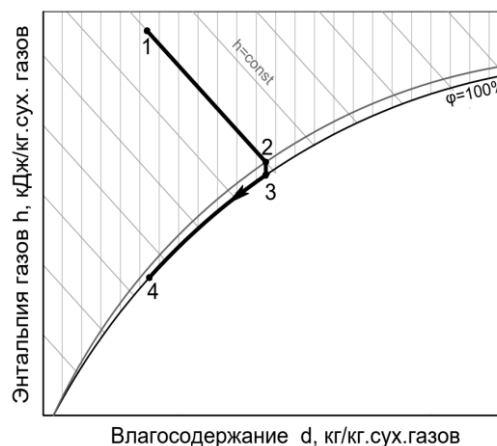


Рис. 3. Термодинамический цикл работы газоконтактной опреснительной установки: 1–2 – увлажнение продуктов сгорания; 2–3 – охлаждение продуктов сгорания до температуры точки росы; 3–4 – осушка продуктов сгорания

Этих недостатков лишена схема с контактным подогревом воды дымовыми газами и последующим адиабатным испарением. Для одноступенчатой установки такого типа производительность установок составляет от 0,043 до 0,22 кг на 1 м³ продуктов сгорания с температурой от 110 до 400 °С [3, 9].

Для НИЭ с температурой менее 80 °С для обеспечения работы опреснительной установки необходимо повысить потенциал ВЭР путем использования встраиваемого в тепловую схему ТТ (рис. 4).

В данном случае речь должна идти о парокompрессионных ТТ, поскольку для абсорбционных установок необходим источник теплоты более высокого потенциала для обеспечения работы генератора.

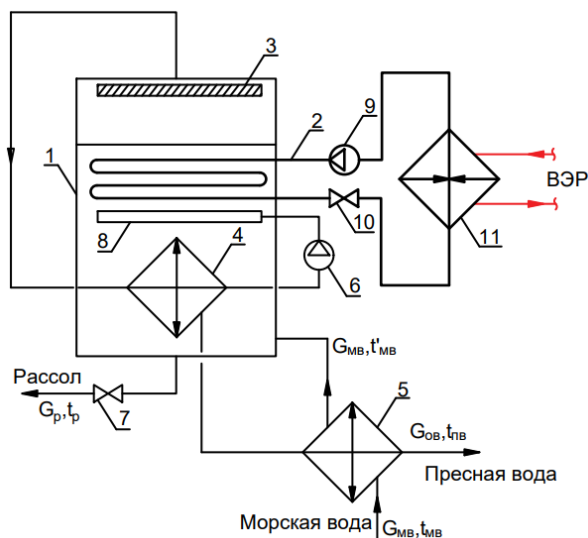


Рис. 4. Принципиальная схема газоконтактной опреснительной установки с трансформатором теплоты: 1 – испарительная колонна; 2 – конденсатор ТТ; 3 – каплеотбойник; 4 – конденсатор; 5 – теплообменник; 6 – газодувка; 7 – сливной кран; 8 – газораспределительная решетка; 9 – компрессор; 10 – терморегулирующий вентиль; 11 – испаритель

В установках с парокompрессионными ТТ низкопотенциальный теплоноситель поступает для охлаждения в испаритель ТТ, за счет чего низкокипящий рабочий агент испаряется, а затем поступает в компрессор, где повышается его давление и температура. В состоянии перегретого пара рабочий агент поступает в конденсатор ТТ, который расположен в испарительной колонне опреснительной установки. В результате отвода тепла рабочий агент конденсируется, а затем отправляется в дроссельное устройство, после которого поступает в испаритель. Для повышения эффективности в предложенной схеме устанавливаются поверхностные теплообменники для осушки паровоздушной смеси, а также предварительного подогрева морской воды за счет охлаждения пресной воды, покидающей установку.

Основным недостатком данного технического решения является усложнение схемы, а

также потребление электрической энергии для обеспечения работы компрессора.

Примером ВЭР, которые могут использоваться в схеме с ТТ, являются: сбросное тепло системы охлаждения ТЭС и АЭС (от 20 до 70 °С); промышленные сточные воды (от 30 до 40 °С); вентиляционные выбросы (от 20 до 40 °С).

Опреснительные установки (рис. 1 и 3) работают по замкнутому термодинамическому циклу (рис. 5), при реализации которого в зону контакта воздушного потока и морской воды подводится низкопотенциальная тепловая энергия. Процесс изменения состояния паровоздушной смеси представлен в диаграмме В.И. Прохорова, в которой учитывается изменение давления паровоздушной смеси в ходе работы установки [11]. В результате подвода теплоты в зону барботаж интенсифицируются процессы увлажнения воздуха, количество влаги, содержащейся в паровоздушной смеси, возрастает (процесс 2–3). Затем она охлаждается, при этом происходит конденсация влаги, содержащейся в воздухе (процесс 3–1). Далее осушенный воздух газодувкой подается в зону барботаж, при этом возрастает его давление (процесс 1–2).

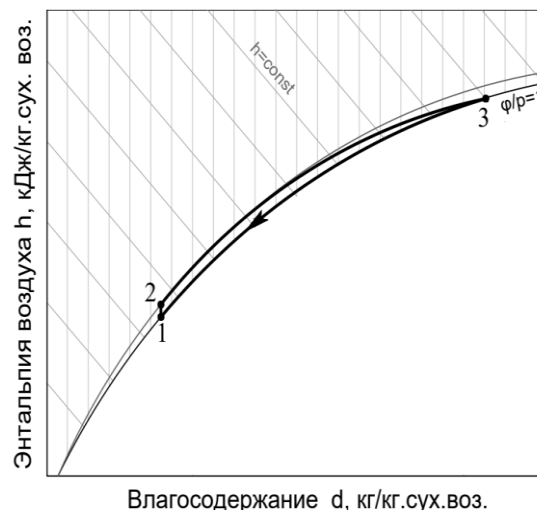


Рис. 5. Термодинамический цикл работы опреснительных установок с воздушным потоком: 1–2 – повышение давления в газодувке; 2–3 – увлажнение паровоздушной смеси; 3–1 – осушка паровоздушной смеси

Методы исследования. Для исследования влияния параметров НИЭ на эффективность работы опреснительной установки был использован метод балансовых расчетов.

Количество энергии, которое должно вноситься с низкопотенциальным ВЭР, для газоконтактной установки, в которой ВЭР используются в качестве греющей среды, определяется из уравнения теплового баланса:

$$Q_{\text{ВЭР}} = G_{\text{пв}} c_{\text{р.пв}} t_{\text{пв}} + G_{\text{р}} c_{\text{р.р}} t_{\text{р}} + G_{\text{мв}} c_{\text{р.мв}} (t_{\text{б}} - t'_{\text{мв}}) - G_{\text{мв}} c_{\text{р.мв}} t_{\text{мв}} + Q_{\text{тп}}, \quad (1)$$

где $G_{\text{пв}}$, $G_{\text{мв}}$, $G_{\text{р}}$ – расходы пресной и морской воды, рассола, кг/с; $t_{\text{пв}}$, $t_{\text{р}}$, $t_{\text{мв}}$ – температуры пресной

воды и рассола на выходе из установки, температура морской воды на входе в установку, °С; $c_{p,пв}$, $c_{p,мв}$, $c_{p,р}$ – массовая изобарная теплоемкость пресной и морской воды, кДж/(кг·К); t_0 – температура морской воды в зоне барботажа, °С; $t'_{мв}$ – температура морской воды на выходе из теплообменника рекуперации теплоты пресной воды, °С; $Q_{тп}$ – тепловые потери, кВт.

Для определения массовых расходов пресной и морской воды, рассола совместно решаются уравнения материального баланса по расходу воды и примесям.

Соответственно, уравнение материального баланса установки по морской воде имеет вид

$$G_{мв} = G_{пв} + G_p. \quad (2)$$

Уравнение материального баланса по массе соли имеет вид

$$\frac{G_{мв} S}{1000} = \frac{G_{пв} S'}{1000} + \frac{G_p S''}{1000}, \quad (3)$$

где S – солёность исходной морской воды, г/л; S'' – солёность рассола, г/л; S' – солёность пресной воды, г/л.

Количество испарившейся пресной воды, уносимое с паровоздушной смесью, может быть определено по формуле

$$G_{пв} = L\rho(d'' - d'), \quad (4)$$

где L – расход сухого воздуха, м³/с; ρ – плотность воздуха, кг/м³; d'' , d' – влагосодержание воздуха на выходе и входе в испарительную колонну, кг/(кг с.в.).

Для расчета параметров работы установки в характерных точках схемы необходимо обладать сведениями о влагосодержании и энтальпии газов после контакта с морской водой, а также после осушки. При расчете термодинамических параметров воздуха используется модель идеального газа, основанная на уравнении состояния Менделеева–Клапейрона.

Влагосодержание воздуха может быть определено по формуле

$$d = \frac{\mu_{H_2O}}{\mu_{сух.в}} \frac{p_n \varphi}{B - p_n \varphi}, \quad (5)$$

где μ_{H_2O} – молярная масса воды, кг/кмоль;

$\mu_{сух.в}$ – молярная масса сухого воздуха, кг/кмоль;

p_n – парциальное давление насыщения водяных паров, Па; φ – относительная влажность, в долях; B – общее давление смеси, Па.

Энтальпия паровоздушной смеси во всех характерных точках схемы определяется в соответствии с выражением

$$h_i = h_{св} \left(1 - \frac{d_i}{d_i + 1} \right) + h_{в.п.i} \frac{d_i}{d_i + 1}, \quad (6)$$

где $h_{св}$ – энтальпия сухого воздуха при температуре и давлении в i -й точке схемы, кДж/кг; $h_{в.п.i}$ – энтальпия водяных паров при температуре и

давлении в i -й точке схемы, кДж/кг; d_i – влагосодержание продуктов сгорания в i -й точке схемы, кг/кг с.в.

Поскольку воздушный поток и дымовые газы взаимодействуют не с чистой водой, а с морской, представляющей собой раствор различных солей, то при расчете парциального давления, используемого при определении влагосодержания, необходимо учитывать, что оно пропорционально мольной доле воды, которая зависит от солёности морской воды.

В тепловых схемах с трансформатором теплоты количество энергии, которое должно отводиться от НИЭ, определяется по формуле

$$Q_{ТТ}^{ВЭР} = (G_{пв} c_{p,пв} t_{пв} + G_p c_{p,р} t_p + G_{мв} c_{p,мв} \times (t_0 - t'_{мв}) - G_{мв} c_{p,мв} t_{мв} + Q_{тп}) \frac{(k-1)}{k}, \quad (7)$$

где k – коэффициент трансформации ТТ.

Определение коэффициента трансформации, а также других характеристик парокомпрессионного ТТ при его работе в составе тепловой схемы опреснительной установки выполнялось в соответствии с рекомендациями, приведенными в [12].

Результаты исследования. Согласно исследованиям [13], наиболее эффективным является эксплуатация паровоздушных установок при температуре увлажнения от 75 до 95 °С и температурах осушки, изменяющихся в диапазоне от 40 до 90 °С.

Низкопотенциальные источники, в частности, могут быть представлены продуктами сгорания, покидающими различные энергетические установки, и могут использоваться в поверхностных теплообменных аппаратах в качестве греющей среды.

Для установки с прямым использованием тепловых ВЭР (рис. 1) были получены зависимости требуемого расхода уходящих газов для получения 1 м³ пресной воды (рис. 6).

Мощность низкопотенциальных ВЭР в таком случае определяется в соответствии с формулой (1).

Согласно полученным зависимостям, меньшее количество уходящих газов требуется при более низкой температуре барботажа, однако в таком случае возрастает мощность газодувки, обеспечивающей перемещение паровоздушной смеси, поскольку при этом воздух способен удерживать меньшее количество влаги. Кроме этого, при более низких температурах интенсивность как процесса увлажнения, так и процесса осушки уменьшается, что приводит к возрастанию требуемой поверхности теплообмена для достижения той же производительности.

В ходе работы опреснительных установок различного принципа действия образуется рассол, который негативно влияет на окружающую среду. Рассол имеет уровень солёности в 1,6–2 раза больше, чем у исходной (морской) воды. Кроме этого, в его составе находятся

различные химические вещества высокой концентрации, такие как хлорид натрия, хлорид железа, хлорид алюминия, гидросульфит натрия и другие соединения, а также продукты их распада [10]. Сегодня на большинстве действующих опреснительных станций рассол не утилизируется.

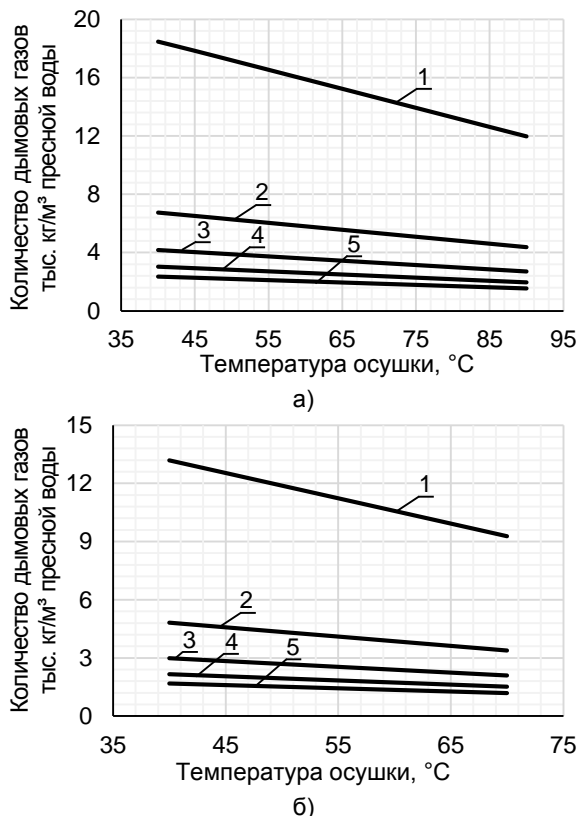


Рис. 6. График зависимости объема уходящих газов от температуры осушки паровоздушной смеси для получения 1 м³ пресной воды для температуры барботажа 95 °C (а) и 75 °C (б): 1 – температура уходящих газов $t_{yx} = 100$ °C; 2 – $t_{yx} = 150$ °C; 3 – $t_{yx} = 200$ °C; 4 – $t_{yx} = 250$ °C; 5 – $t_{yx} = 300$ °C

Существует несколько способов утилизации рассола: разбавление перед сбросом; глубоководный сброс через рассеивающие диффузоры для ускорения смешивания; использование испарительных бассейнов (в засушливых регионах) с последующей добычей солей; рекуперация полезных веществ (магния, лития, брома) для промышленности.

Стоит отметить, что НИЭ также возможно использовать для интенсификации процесса упаривания рассола в испарительных бассейнах для получения соли. Например, при более высоком потенциале ВЭР абсорбционные трансформаторы теплоты могут применяться в системах опреснения, при этом избытки теплоты, которые отводятся от абсорбера, могут использоваться для упаривания рассола. Зависимости количества энергии, необходимого для упаривания рассола, образующегося при производстве 1 м³ пресной воды, от солёности и температуры осушки приведены на рис. 7.

В ранее проведенных исследованиях [5] была определена зависимость производительности газоконтактных опреснительных установок, в которых осуществляется взаимодействие дымовых газов и морской воды, от температуры уходящих газов и их расхода. Стоит отметить, что вода, получаемая в таких установках, является непригодной для потребления в качестве питьевой и может использоваться только для технических и хозяйственно-бытовых нужд.

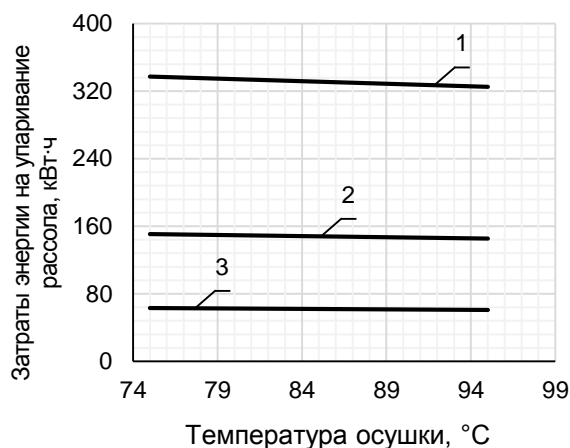


Рис. 7. Зависимости затрат энергии на упаривание рассола от температуры осушки и солёности морской воды: 1 – $S = 35$ г/л; 2 – $S = 20$ г/л; 3 – $S = 10$ г/л

При температуре НИЭ менее 80 °C для повышения потенциала подаваемого в колонну энергоносителя могут устанавливаться ТТ. Значение коэффициента трансформации зависит от типа рабочего агента, а также температурных уровней работы ТТ. При выборе рабочего тела необходимо учитывать не только энергетические, но и экологические аспекты: озоноразрушающий потенциал (ОРП), а также потенциал глобального потепления/ Global Warming Potential (GWP) [14].

Для выбранного диапазона температур работы опреснительной установки в ТТ могут использоваться рабочие агенты R600, R600a, R142b, R717, R245fa, R134a, R1234ze (Z), характеристики которых приведены в таблице.

Анализ данных таблицы показывает, что использование практически всех рассматриваемых рабочих тел не приводит к разрушению озонового слоя (ОРП равен или близок к 0), однако R142b менее экологичен из-за наличия в составе его молекулы хлора. Из всех вышеперечисленных рабочих тел только аммиак характеризуется нулевым потенциалом глобального потепления.

Для выбора наиболее эффективного рабочего тела был выполнен тепловой расчет опреснительной установки с ТТ, результаты которого представлены на диаграмме (рис. 8). В качестве одного из показателей эффективности установки рассматривается энергопотребление компрессора ТТ.

Рабочий агент	Название и химическая формула	Критическая температура, °C	GWP	ОРП
R600	Бутан (C_4H_{10})	152,0	3	0
R600a	Изобутан ($(CH_3)_3CH$)	135,0	3	0
R1234ze(Z)	Цис-1,3,3,3-тетрафторпропен (Z-изомер) ($C_3H_2F_4$)	153,7	<1	0
R142b	Дифторхлорэтан (CF_2ClCH_3)	137,1	540	0,057
R717	Аммиак (NH_3)	132,4	0	0
R245fa	1,1,1,3,3-пентафторпропан ($C_3H_3F_5$)	157,6	1030	0
R134a	Тetraфторэтан ($C_2H_2F_4$)	101,1	1300	0

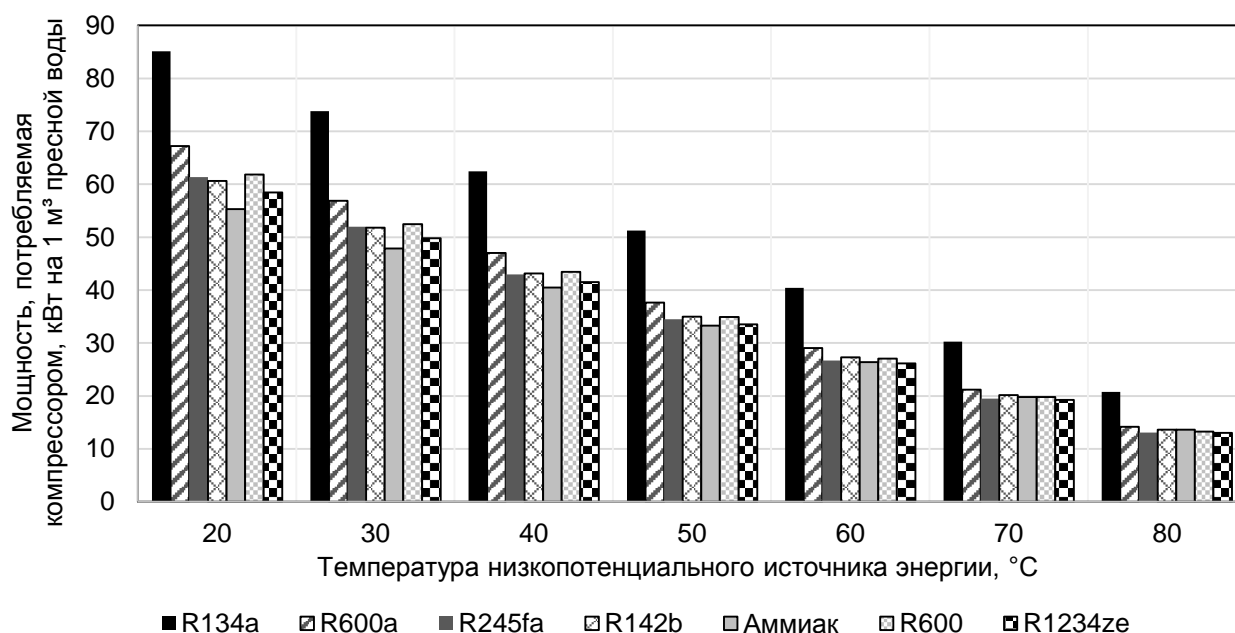


Рис. 8. Зависимость мощности, потребляемой компрессором трансформатора теплоты, от температуры низкопотенциального источника для разных рабочих тел

Анализ диаграммы (рис. 8) показывает, что практически во всем диапазоне температур НИЭ наиболее эффективным является использование аммиака в качестве рабочего тела ТТ. Однако при более высоких температурах (более 60 °C) аммиак по эффективности незначительно уступает фреону R245fa.

В целом при всех исследуемых температурах наиболее эффективным является аммиак, R1234ze и R245fa. В этой связи более подробное исследование было проведено для данных рабочих тел. Были построены номограммы (рис. 9), позволяющие по температуре низкопотенциального источника при различных температурах барботажа определить количество электрической энергии, потребляемой компрессором для производства 1 м³ пресной воды, а также количество энергии, отбираемое от НИЭ.

Согласно полученным зависимостям (рис. 8), количество энергии, потребляемое

компрессором при работе ТТ на R1234ze и R245fa, отличается во всем диапазоне рассматриваемых температур барботажа и НИЭ не более чем на 4 % (0,67 кВт·ч/м³). Минимальное энергопотребление характерно для аммиака, однако данное рабочее тело является токсичным.

Для оценки эффективности интеграции ТТ в тепловые схемы газоконтактных опреснительных установок при различных параметрах был рассчитан расход топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) для производства 1 м³ пресной воды при использовании ТТ и при использовании тепловой энергии, полученной в результате сжигания топлива (рис. 10).

Согласно результатам расчетов, расход условного топлива для получения 1 м³ пресной воды при использовании ТТ в зависимости от параметров НИЭ составляет от 3,12 до 19,78 кг.

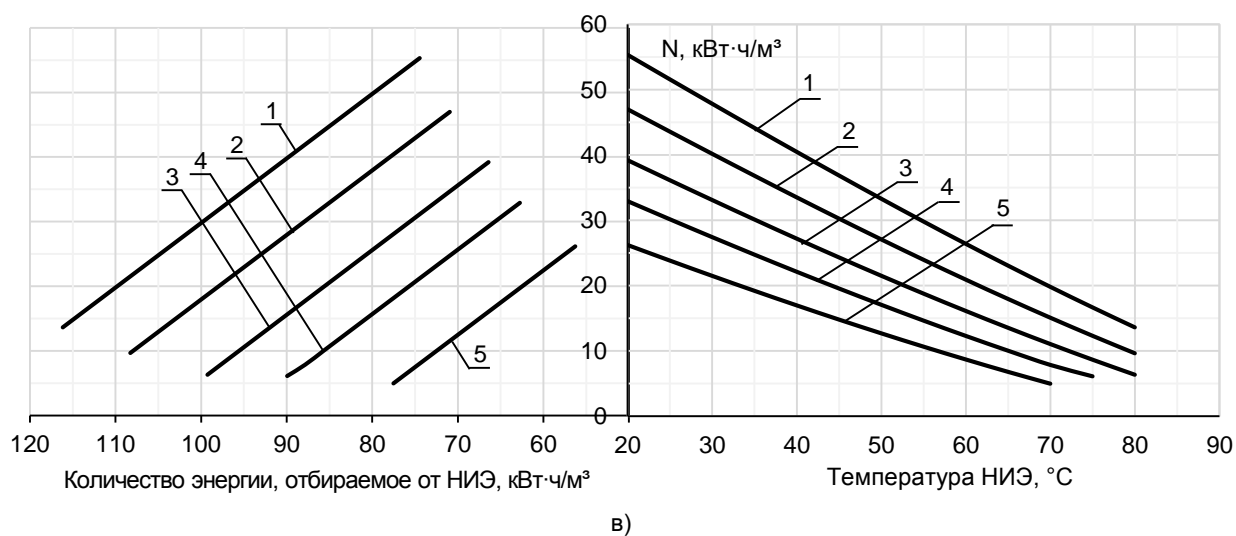
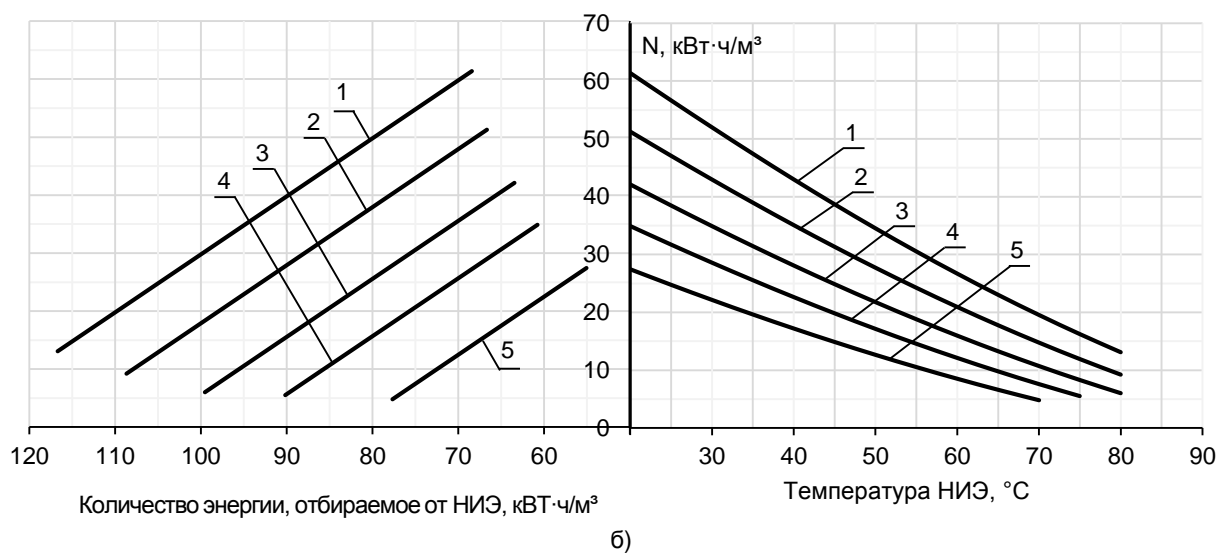
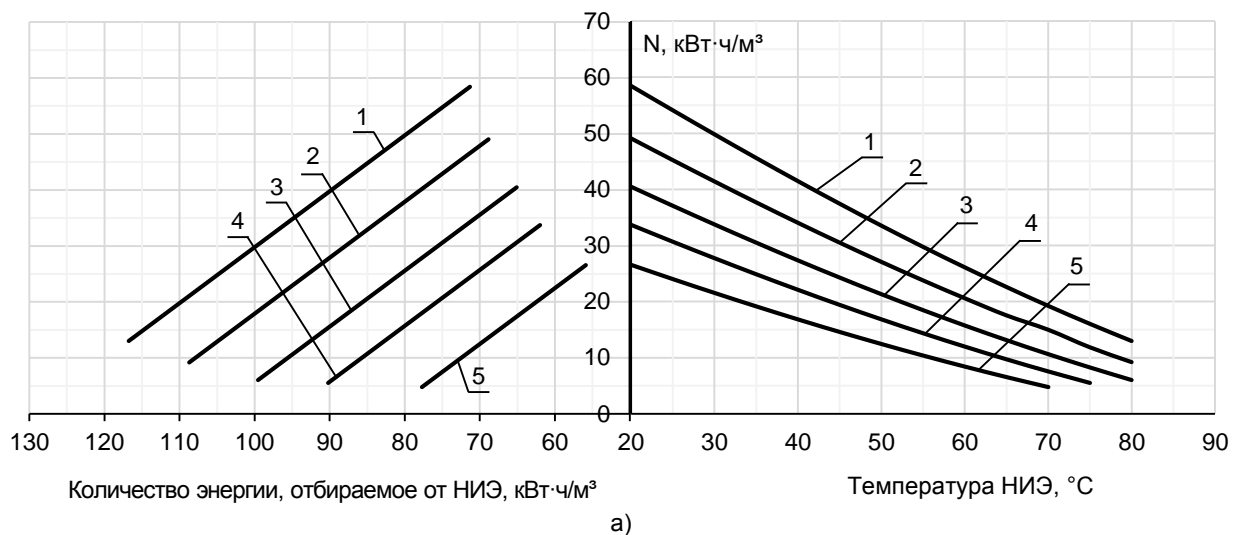


Рис. 9. Зависимость мощности, потребляемой компрессором ТТ, от температуры НИЭ и соответствующей ей требуемой мощности НИЭ для R1234ze (а), R245fa (б); аммиака (в): 1 – температура барботаж 95 °С; 2 – 90 °С; 3 – 85 °С; 4 – 80 °С; 5 – 75 °С

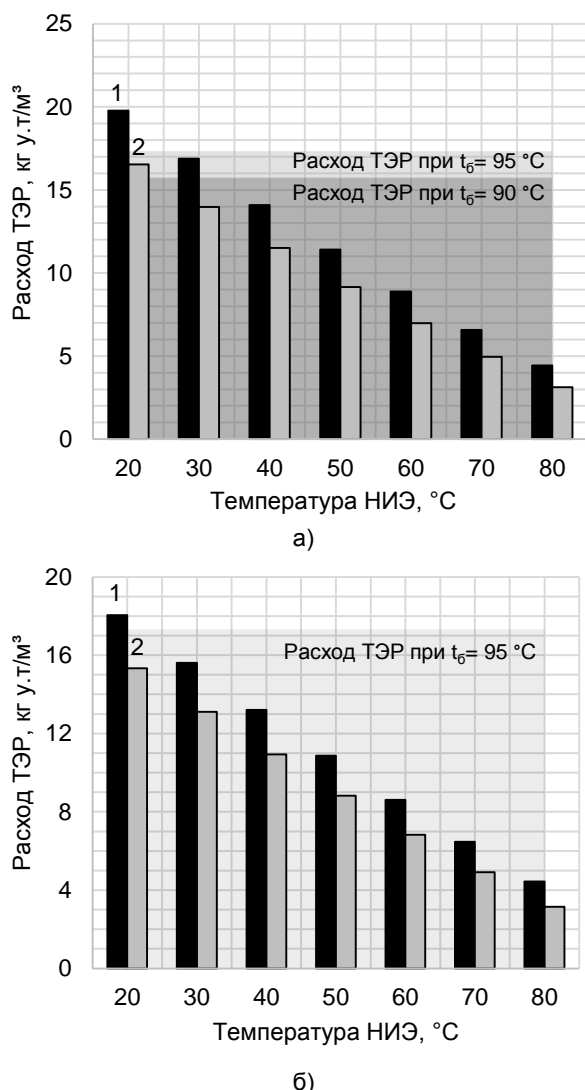


Рис. 10. Расход топливно-энергетических ресурсов при работе ТТ в составе опреснительной установки при утилизации НИЭ: а – R245fa; б – аммиак; 1 – $t_6 = 95\text{ °C}$; 2 – $t_6 = 90\text{ °C}$

В результате исследования выявлено, что использование ТТ для утилизации НИЭ при температурах источника менее 29 °C (для R142b и для R245fa) и 24 °C (для аммиака) при температуре барботаж 95 °C по затратам ТЭР становится сопоставимым с использованием тепловой энергии, получаемой в результате сжигания топлива.

Выводы. Предложенные схемные решения по использованию низкопотенциальных ВЭР в системах опреснения, функционирующих на базе газоконтактных опреснительных установок, для различных параметров НИЭ и их видов, имеют преимущества и недостатки. Параметрический анализ этих схем показал, что для утилизации теплоты продуктов сгорания, в зависимости от требований, предъявляемых к пресной воде, возможно их использование в контактной испарительной колонне, в которой протекают теплообменные процессы между дымо-

выми газами и морской водой, а также в качестве греющей среды в паровоздушных опреснительных установках.

Выявлено, что при температурах ВЭР превышающих 80 °C , возможно их использование в поверхностных теплообменных аппаратах паровоздушных опреснительных установок. При более низком потенциале ВЭР необходима установка трансформаторов теплоты, усложняющих тепловую схему опреснителя.

Установлено, что для рабочего диапазона температур газоконтактных опреснительных установок наибольшая эффективность пароконпрессионных трансформаторов теплоты достигается при использовании аммиака, являющегося наиболее экологичным рабочим телом, а также R142b и R245fa.

При температурах ВЭР менее 24 °C использование в тепловых схемах опреснителей пароконпрессионного трансформатора теплоты становится неэффективным при температурах барботаж 90 и 95 °C .

Список литературы

1. **Энергосбережение** в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учебник / А.Б. Горяев, И.В. Яковлев, А.В. Клименко и др. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: НИУ МЭИ, 2021. – 504 с.
2. **Слесаренко В.Н.** Современные методы опреснения морских и соленых вод. – М.: Энергия, 1973. – 248 с.
3. **Дыхно А.Ю.** Использование морской воды на тепловых электростанциях. – М.: Энергия, 1974. – 269 с.
4. **Ковалев О.П.** Теплообмен в контактных пленочных аппаратах судовой утилизационной опреснительной установки на дымовых газах (разработка методики теплового расчета): дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05. – Владивосток, 1984. – 171 с.
5. **Разработка** тепловой схемы газоконтактной опреснительной установки и анализ условий ее применения / В.М. Лапшова, М.В. Козлова, А.В. Банников и др. // Вестник ИГЭУ. – 2024. – Вып. 6. – С. 5–14.
6. **Слесаренко В.Н.** Дистилляционные опреснительные установки. – М.: Энергия, 1980. – 248 с.
7. **Бирюков А.Б., Лебедев А.Н., Каминский К.Д.** Методика определения температуры точки росы продуктов сгорания природного газа // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 6. – С. 43–49.
8. **Николаева Н.А.** Определение потенциала энергосбережения вторичных энергоресурсов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2014. – № 12-1. – С. 69–72.
9. **Пат. № 2841750 С1** Российская Федерация, МПК C02F 1/02, C02F 1/16. Газоконтактная опреснительная установка: заявл. 08.10.2024; опубл. 17.06.2025 / М.В. Козлова, А.В. Банников, В.М. Лапшова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».
10. **Современные** методы опреснения воды / М.В. Колодин, А.Ю. Дыхно, А. Гельдыев, Е.М. Рутгайзер; под науч. ред. д-ра техн. наук проф. В.А. Клячко;

АН Туркм. ССР. Ин-т пустынь. – Ашхабад: Ылым, 1967. – 181 с.

11. Прохоров В.И. I-d-диаграммы влажного воздуха для переменных давлений. – М.: Книга, 1973. – 30 с.

12. Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. – М.: Энергия, 1968. – 336 с.

13. Козлова М.В., Банников А.В., Банникова С.А. Исследование работы термической опреснительной установки с контактным испарителем и компрессией паровоздушной смеси // Вестник ИГЭУ. – 2024. – Вып. 5. – С. 21–30.

14. Коршунова Т.Е., Колесов В.А. Исследование экологической безопасности, эффективности и развития хладагентов судового холодильного оборудования рыбной отрасли России в рамках международных протоколов // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2024. – Т. 70, № 4. – С. 204–213.

References

1. Garyaev, A.B., Yakovlev, I.V., Klimenko, A.V., Danilov, O.L., Ochkov, V.F., Vakulko, A.G. *Energoberezhenie v teploenergetike i teplotekhnologiyakh* [Energy saving in thermal power engineering and heat technologies]. Moscow: NIU MEI, 2021. 504 p.

2. Slesarenko, V.N. *Sovremennye metody opresneniya morskikh i solenyykh vod* [Modern methods of desalination of marine and salt waters]. Moscow: Energiya, 1973. 248 p.

3. Dykhno, A.Yu. *Ispol'zovanie morskoy vody na teplovykh elektrostantsiyakh* [The use of marine water in thermal power plants]. Moscow: Energiya, 1974. 269 p.

4. Kovalev, O.P. *Teplomassoobmen v kontaktnykh plenochnykh apparatakh sudovoy utilitatsionnoy opresnitel'noy ustanovki na dymovykh gazakh (razrabotka metodiki teplovogo rascheta)*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Heat and mass transfer in compact film apparatuses of a ship's waste desalination plant using diesel gases (development of a thermal calculation methodology). Cand. tech. sci. diss.]. Vladivostok, 1984. 171 p.

5. Lapshova, V.M., Kozlova, M.V., Bannikov, A.V., Bannikova, S.A., Gorbunov, V.A. *Razrabotka teplovoy skhemy gazokontaktnoy opresnitel'noy ustanovki i analiz usloviy ee primeneniya* [Development of the thermal circuit of a gas-contact desalination plant and analysis of its

application conditions]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 6, pp. 5–14.

6. Slesarenko, V.N. *Distillyatsionnye opresnitel'nye ustanovki* [Distillation desalination plants]. Moscow: Energiya, 1980. 248 p.

7. Biryukov, A.B., Lebedev, A.N., Kaminskiy, K.D. *Metodika opredeleniya temperatury tochki rosy produktov sgoraniya prirodnogo gaza* [Methodology for determining the dew point temperature of natural gas combustion products]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 6, pp. 43–49.

8. Nikolaeva, N.A. *Opredelenie potentsiala energosberezheniya vtorichnykh energoresursov* [Determination of the energy saving potential of secondary energy resources]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 2014, no. 12-1, pp. 69–72.

9. Kozlova, M.V., Bannikov, A.V., Lapshova, V.M. *Gazokontaktная opresnitel'naya ustanovka* [Gas contact desalination plant]. Patent RF, no. 2841750 C1, 2025.

10. Kolodin, M.V., Dykhno, A.Yu., Gel'dyev, A., Rutgayzer, E.M. *Sovremennye metody opresneniya vody* [Modern methods of water desalination]. Ashkhabad: Ylym, 1967. 181 p.

11. Prokhorov, V.I. *I-d-diagrammy vlazhnogo vozdukhа dlya peremennykh davleniy* [I-d-diagrams of moist air for variable pressures]. Moscow: Kniga, 1973. 30 p.

12. Sokolov, E.Ya., Brodyanskiy, V.M. *Energeticheskie osnovy transformatsii tepla i protsessov okhlazhdeniya* [Energy foundations of heat transformation and cooling processes]. Moscow: Energiya, 1968. 336 p.

13. Kozlova, M.V., Bannikov, A.V., Bannikova, S.A. *Issledovanie raboty termicheskoy opresnitel'noy ustanovki s kontaktnym isparitelem i kompressiey parovozdushnoy smesi* [Investigation of the operation of a thermal desalination plant with a contact evaporator and compression of a steam-stuffy mixture]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 5, pp. 21–30.

14. Korshunova, T.E., Kolesov, V.A. *Issledovanie ekologicheskoy bezopasnosti, effektivnosti i razvitiya khladagentov sudovogo kholodil'nogo oborudovaniya rybnoy otrasli Rossii v ramkakh mezhdunarodnykh protokolov* [Investigation of environmental safety, efficiency and development of refrigerants of marine refrigeration equipment in the fishing industry of Russia within the framework of international protocols]. *Nauchnye trudy Dal'rybvтуza*, 2024, vol. 70, no. 4, pp. 204–213.

УДК 536.2.023:519:669:699.86

Анатолий Константинович Соколов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-96-44, e-mail: aks2411@yandex.ru

Использование охранных нагревателей для создания адиабатных условий в теплофизических экспериментах

Авторское резюме

Состояние вопроса. Теплофизические характеристики материалов определяются в основном решением обратных задач теплопроводности по температурным полям, полученным в результате теплофизических экспериментов. Для упрощения последующей обработки измеренных значений параметров температурных полей в большинстве случаев стараются использовать одномерные температурные поля неограниченных пластин или цилиндров, которые создаются путем организации симметричного нагрева или применения специальных охранных нагревателей. В связи с этим задача исследования влияния охранных нагревателей на температурное поле пластины является весьма актуальной.

Материалы и методы. Анализ и проверка эффективности способа создания адиабатных условий выполнены с помощью охранных нагревателей. Для исследования влияния охранных нагревателей на температурное поле исследуемого материала разработана численно-аналитическая модель процесса и компьютерная программа.

Результаты. Проведены расчеты температурных полей материала (стали) в форме усеченного цилиндра и кольца с охранным нагревателем. Выполнена оценка погрешности создания адиабатных условий для нескольких способов регулирования мощности охрannого нагревателя.

Выводы. Установлено, что ни один из режимов работы охрannого нагревателя в принципе не может создать условия идеальной адиабаты. Показана возможность подбора параметров физического эксперимента, при которых погрешность создания адиабатных условий можно снизить до приемлемых значений.

Ключевые слова: теплофизический эксперимент, адиабатные условия, охранный нагреватель, задачи теплопроводности, численно-аналитическая метод

Anatoly Konstantinovich Sokolov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Postdoctoral degree), Professor of Health and Safety Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-96-44, e-mail: aks2411@yandex.ru

On the use of guarding heaters to create adiabatic conditions in thermophysical experiments

Abstract

Background. The thermophysical characteristics of materials are mainly determined by solving inverse problems of thermal conductivity over temperature fields obtained as a result of thermophysical experiments. To simplify the subsequent processing of the measured values of the temperature field parameters, in most cases they try to use one-dimensional temperature fields of unlimited plates or cylinders, which are created by organizing symmetrical heating or using special guarding heaters. Thus, the task to study the influence of guarding heaters on the temperature field of the plate is very relevant.

Materials and methods. The paper analyzes and checks the effectiveness of the method for creating adiabatic conditions using guarding heaters. To study the effect of guarding heaters on the temperature field of the material under study, a numerical-analytical model of the process and a computer program have been developed.

Results. Calculations of the temperature fields of a material (steel) in the form of a truncated cylinder and a ring with a guarding heater have been carried out. The error of creating adiabatic conditions for several methods of regulating the power of a guarding heater has been estimated.

Conclusions. It is established that none of the operating modes of the guarding heater can in principle create conditions of perfect adiabatic operation. It is shown that it is possible to select the parameters of a physical experiment at which the error of creating adiabatic conditions can be reduced to acceptable values.

Key words: thermophysical experiment, adiabatic conditions, guarding heater, heat conduction problems, numerical-analytical method

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.028-035

Введение. Постановка задачи. Теплофизические эксперименты проводятся для исследования температурных полей, а также для определения теплофизических характеристик металлов и материалов (огнеупорных, теплоизоляционных, строительных).

В процессе специфических тепловых воздействий при определенных начальных и граничных условиях производятся измерения температур поверхностей или температур в определенных точках внутри тел.

Для упрощения теплофизического эксперимента и последующей обработки численных значений параметров температурных полей, например, для определения теплофизических характеристик (ТФХ) материалов [1–7] в большинстве случаев стараются использовать одномерные температурные поля пластины или цилиндра неограниченных размеров. Для расчета таких полей имеются аналитические решения [8, 9], более простые математические модели и программные средства [10].

Неограниченной пластиной принято считать такую пластину, ширина и длина которой является бесконечной или во много раз больше толщины пластины [8, 9]. Для реальных технических систем и экспериментальных установок, в которых используются тела конечных размеров, понятие бесконечного размера неприменимо.

В известной нам литературе [8, 9] понятие неограниченной пластины характеризуется нечеткими терминами (толщина мала по сравнению с длиной, ширина значительно или во много раз больше толщины и т.п.). При этом не указано, как принять размеры пластины (длина, ширина), которые должны соответствовать понятию неограниченной пластины.

С точки зрения теории теплопроводности на некотором расстоянии от центра неограниченной пластины поток теплоты по второй координате должен быть равен нулю.

Другими словами, пластину с размерами R_x , R_y , где R_x – толщина, а R_y – длина или ширина пластины, можно считать неограниченной, если в ее центре или на некотором удалении от него будут созданы адиабатные условия по оси y :

$$dT(x, y) / dy = 0.$$

Применение понятия неограниченной пластины к реальным телам позволяет обоснованно ограничивать размеры тел в физических экспериментах и решать дифференциальные уравнения теплопроводности в одномерной постановке.

Для создания адиабатных условий применяют симметричный нагрев или специальные дополнительные нагреватели [7, 11].

В патенте на изобретение [7] предложено создавать адиабатные условия с помощью тепловой изоляции части поверхности пластины и охранных нагревателей (рис. 1).

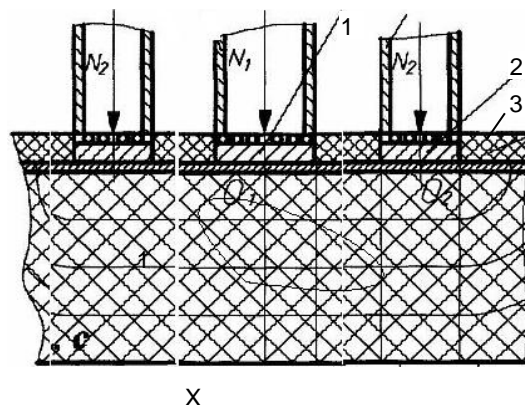


Рис. 1. Схема создания адиабатных условий для температурного поля под нагревателем N_1 : N_1 , N_2 – зонды с нагревателями; 1 – основной дисковый нагреватель (N_1); 2 – кольцевой охранный нагреватель (N_2); 3 – тепловая изоляция

Такая схема с охранными нагревателями использовалась для того, чтобы к пластине ограниченных размеров можно было применить понятие неограниченной пластины и полуограниченного тела. Это позволило в методике определения теплофизических характеристик материала решать обратную задачу теплопроводности в одномерной постановке.

Согласно [7], мощность кольцевого охранный нагревателя 2 должна поддерживаться такой, чтобы его температура была равна температуре нагревателя центрального зонда 1 (рис. 1) для исключения теплоотдачи в окружающую среду.

Был проведен теоретический анализ работы устройства и возможности его практической реализации путем использования охранных нагревателей с определенным режимом их работы. В результате проведенного анализа возникли сомнения о возможности практической реализации использования охранных нагревателей в таком виде и методики определения теплофизических характеристик решением обратной задачи теплопроводности.

Патент на изобретение [7] имеет следующие основные недостатки.

1. Очевидный недостаток заключается в том, что поток теплоты Q_1 от первого зонда будет идти от него не только вниз, но и вверх через тепловую изоляцию между зондами 1 и 2. Следовательно, величина теплового потока в расчетной модели будет меньше потока, измеряемого в эксперименте, на неопределенную величину. Естественно, это приведет к погрешности расчетов ТФХ.

2. Не доказано, что между зондами 1 и 2 установятся адиабатные условия, а условный цилиндр под нагревателем 1 является неограниченной пластиной и полуограниченным телом.

3. Линии изотерм показаны неадекватно.

Идея использования охранных нагревателей для создания адиабатных условий достаточно интересна, поэтому была поставлена

задача проверки такой схемы организации нагрева и оценки ее возможностей.

Для определения способности охранных нагревателей создавать граничные условия, соответствующие условиям адиабаты, необходимо исследовать температурные поля тел, образующиеся при тепловых воздействиях источников тепловых потоков 1 и 2 (см. рис. 1).

Методика исследования. Исследование температурных полей целесообразно выполнить с помощью программных средств, которые могли бы решать не только прямые задачи теплопроводности, но и обратную задачу теплопроводности: подбирать мощность охранных нагревателей для создания адиабатных условий.

На рис. 2 представлена расчетная схема теплообмена для исследования температурных полей. Рассмотрим, сможет ли охранный нагреватель 1 создать на условной образующей цилиндра 4 распределение температур $T_2(X, Y = 0)$, эквивалентное температурному полю $T_1(X)$, создаваемому дисковым нагревателем 2.

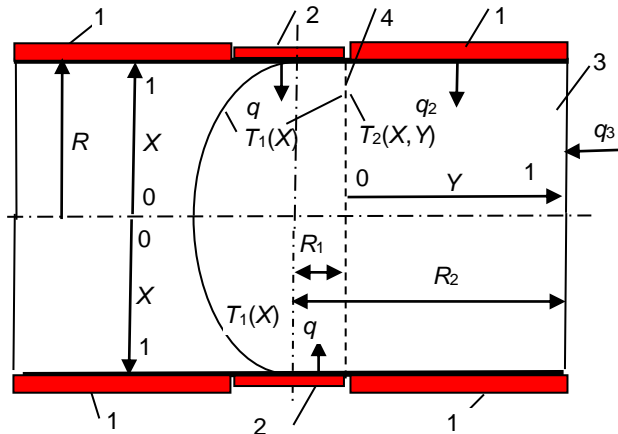


Рис. 2. Схема симметричного нагрева усеченного цилиндра: 1 – кольцевой охранный нагреватель; 2 – основной дисковый нагреватель; 3 – материал (сталь); 4 – условная образующая цилиндра, на которой должна создаваться адиабата

Таким образом, необходимо выполнить расчет одномерного температурного поля, создаваемого потоком q , и двумерного температурного поля, создаваемого потоками теплоты q_2 и q_3 , где q_3 имеет отрицательное значение.

Для определения параметров температурных полей $T_1(X)$ и $T_2(X, Y)$ используем чрезвычайно простой численный аналитический метод моделирования температурных полей [10]. Суть метода заключается в использовании аналитических решений дифференциального уравнения теплопроводности для интервала времени $\Delta\tau$, в конце которого распределение температур $T(X)$ аппроксимируется параболическим или степенным [10] уравнениями. Численное интегрирование этих решений по времени осуществляется при условии, что средняя температура тела в начале каждого последую-

щего $i+1$ -го интервала времени $\Delta\tau_{i+1}$ равна средней температуре в конце i -го интервала $\Delta\tau_i$.

Дифференциальное уравнение теплопроводности для усеченного цилиндра как для неограниченной пластины толщиной R

$$c \frac{\partial T}{\partial \tau}(X, \tau) = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial X} \lambda \frac{\partial T}{\partial X}(X, \tau) \quad (1)$$

запишется при следующих краевых условиях:

$$T(X, \tau = 0) = T_n, 0 \leq X \leq 1, X = x/R; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial X}(X = 0, \tau) = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial X}(1, \tau) = \frac{R}{\lambda} q, \quad (4)$$

где c – теплоемкость материала, Дж / (м³·К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт / (м·К); q – поток теплоты, Вт / м²; T_n – начальная температура в момент времени $\tau = 0$.

Представим распределение температур в конце расчетного интервала времени $\Delta\tau_{i+1} = \Delta\tau_i + \Delta\tau$ в виде

$$T_1(X) = a_0 + a_2 X^2. \quad (5)$$

Тогда значения температуры поверхности круга цилиндра $X = 1$, термического центра $X = 0$ и средней массовой температуры определяются по формулам [10], полученным из уравнения (5):

$$T_1(X = 1) = a_0 + a_2; \quad (6)$$

$$T_1(X = 0) = a_0; \quad (7)$$

$$T_{1, \text{ср}} = a_0 + a_2 / 3, \quad (8)$$

где

$$a_0 = T_{\text{ср.ни}} + \frac{q \Delta\tau}{cR} - \frac{qR}{6\lambda}; \quad (9)$$

$$a_2 = \frac{qR}{2\lambda}, \quad (10)$$

где $T_{\text{ср.ни}}$ – средняя температура в начале интервала времени $\Delta\tau_{i+1}$.

Для второго тела (условного кольца) необходимо не только рассчитать температурное поле, но и решить обратную задачу теплопроводности, а именно рассчитать динамику изменения q_2 , при которой распределение температур на границе цилиндра и кольца будет одинаковым или будет соблюдаться равенство некоторых температур, например температуры поверхности, температуры центра или средней массовой температуры.

Это значит, что температуры усеченного цилиндра на вертикальной поверхности образующей цилиндра 4 (рис. 2) будут равны температурным параметрам на внутренней поверхности кольца.

Двумерное температурное поле кольца в конце $i+1$ -го интервала $\Delta\tau$ времени аппроксимируем функцией [10]

$$T_2(X, Y) = a_0 + a_2 X^2 + b_2 Y^2. \quad (11)$$

С учетом функции (11) начальные и граничные условия кольца могут быть представлены в следующем виде:

$$T_2(X, Y, \tau=0) = T_n = a_0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial X}(X=1, Y=0, \tau) \frac{\lambda}{R} = q_2 = \frac{2a_2\lambda}{R}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial X}(X=0, Y, \tau) = 0; \quad (14)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial Y}(X, Y=0, \tau) = 0; \quad (15)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial X}(X, Y=1, \tau) \frac{\lambda}{\Delta R} = q_3 = \frac{2b_2\lambda}{\Delta R}, \quad (16)$$

где $\Delta R = R_2 - R_1$.

Параметры температурного поля не сложно определить по функции (11), если знать коэффициенты a_0 , a_2 и b_2 на каждом временном интервале расчета.

Формулы для расчета коэффициентов функции (11) можно найти по краевым условиям (12)–(16) и уравнениям баланса теплоты на интервале времени $\Delta\tau$.

Коэффициенты a_2 и b_2 выразим из граничных условий (13) и (16) для конца интервала времени τ_{i+1} :

$$a_2 = q_2 R / (2\lambda); \quad (17)$$

$$b_2 = q_3 \Delta R / (2\lambda). \quad (18)$$

Коэффициент a_0 определится из уравнения баланса теплоты на интервале времени $\Delta\tau$:

$$\begin{aligned} c_i V (T_{cp,i+1} - T_{cp,i}) = \\ = (q_2 \pi \Delta(R^2) + q_3 2\pi R R_2) \Delta\tau, \end{aligned} \quad (19)$$

где

$$\Delta(R^2) = R_2^2 - R_1^2; \quad (20)$$

V – объем условного кольца, m^3 :

$$V = \pi R \Delta(R^2); \quad (21)$$

$T_{cp,i}$ и $T_{cp,i+1}$ – среднемассовые температуры в начале и конце интервала времени $\Delta\tau$ [10]:

$$T_{cp,i+1} = a_0 + a_2 / 3 + b_2 S, \quad (22)$$

$$\text{где } S = (R_1 + 3 R_2) / 6 / (R_1 + R_2). \quad (23)$$

Поток теплоты q_3 для конвективного (или радиационного, приведенного к конвективному) теплообмена запишется в виде

$$q_3 = \alpha (T_{oc} - T_{cp,Y=1}), \quad (24)$$

где α – коэффициент теплообмена, $Вт/(м^2 \cdot К)$; T_{oc} – температура окружающей среды, $К$; $T_{cp,Y=1}$ – средняя температура наружной образующей поверхности кольца:

$$T_{cp,Y=1} = \int_0^1 T_2(X, Y=1) dX = a_0 + \frac{q_2 R}{6\lambda} + b_2. \quad (25)$$

С учетом выражений (17) и (25) и приведения подобных уравнение (24) примет вид

$$q_3 = \alpha [T_{oc} - (a_0 + q_2 R / (6\lambda))] / (1 - \alpha \Delta R / (2\lambda)). \quad (26)$$

Поток теплоты, согласно (24), имеет отрицательное значение, поэтому фактически будет направлен в окружающую среду (см. рис. 2).

Подставив выражения (22) и (26) в уравнение баланса теплоты (19), получим из него формулу для расчета a_0 :

$$a_0 = \frac{S_1 - S_2 A - q_2 R / (6\lambda) + T_{cp,i}}{1 - \alpha \cdot A / [\Delta R \cdot \alpha / (2\lambda)]}, \quad (27)$$

где

$$S_1 = \pi q_2 - \Delta(R^2) \Delta\tau / (c_i V); \quad (28)$$

$$S_2 = \frac{\alpha A (T_{oc} - q_2 R / (6\lambda))}{1 + \Delta R \alpha / (2\lambda)}; \quad (29)$$

$$A = \frac{\Delta R S}{2\lambda} - \frac{2\pi R_2 R \Delta\tau}{c_i V}. \quad (30)$$

Зная величины коэффициентов a_0 , a_2 и b_2 в функции (11), можно рассчитать параметры температурного поля кольца:

– среднюю температуру внутренней образующей

$$T(X, Y=1) = a_0 + a_2 / 3; \quad (31)$$

– температуры на поверхности кольца с координатами $[X=1, Y=0]$ и $[X=0, Y=0]$:

$$T(X=1, Y=0) = a_0 + a_2; \quad (32)$$

$$T(X=0, Y=0) = a_0. \quad (33)$$

Для расчета параметров температурных полей усеченного цилиндра и кольца разработана программа ADIAB в среде Microsoft Excel. При расчете полей было условно принято (см. граничные условия), что между ними располагается адиабатная поверхность, поэтому температурные поля рассчитывались по приведенным выше формулам независимо друг от друга.

Для проверки правильности вывода формул и программирования по рекомендациям [12] выполнены следующие тесты.

Расчеты для усеченного цилиндра проведены по программам TRT [10] и ADIAB.

По программе ADIAB выполнены расчеты:

1) для кольца как неограниченной пластины при $\alpha = 0$ и $q_2 = 60 \text{ кВт}/м^2$;

2) кольца как неограниченного цилиндра при $R_1 = 0,00001$ м, $R_2 = 0,03$ м $q_2 = 0$, $\alpha = 250$ Вт/(м²·К), $T_{oc} = 800$ К.

Вычисления проводились как при постоянных, так и при зависящих от температуры теплофизических характеристиках.

Аналогичные расчеты проведены по программе TRT, а также по формулам и номограммам [8, 9, 13, 14].

Обратите внимание, что поток теплоты q_2 , входящий в формулу (27) для расчета a_0 , должен создавать адиабатные условия на границе цилиндра и кольца 4 (рис. 2), а также компенсировать потери теплоты q_3 . Следовательно,

$$q_2 = q - q_{3п}, \quad (34)$$

где $q_{3п}$ – поток q_3 , приведенный к площади кольца, равной $\pi (\Delta R^2)$:

$$q_{3п} = q_3 \cdot 2R_2 R / (\Delta R^2). \quad (35)$$

Зависимость

$$a_0 = f(q_2(q, q_{3п}))$$

является нелинейной и должна решаться методом последовательных приближений.

В программе Microsoft Excel имеется возможность организации циклических ссылок и проведения итерационных вычислений.

Результаты исследования. Выполнено исследование нескольких способов регулирования работы охранных нагревателей для создания адиабатных условий.

Расчеты температурных полей проведены по программе ADIAB для материала из стали, теплофизические характеристики которой a и λ описываются ломаными линиями [10]:

$$\lambda = 63,405 - 32,56 \cdot T/1000, \quad 300 \leq T \leq 1142,72,$$

$$\lambda = 16,228 + 8,721 \cdot T/1000, \quad T > 1142,72; \quad (36)$$

$$a = (18,1 - 13,4 \cdot T/1000) \cdot 10^{-6}, \quad 300 \leq T \leq 977,6,$$

$$a = (3,378 + 1,1667 \cdot T/1000) \cdot 10^{-6}, \quad T > 977,6; \quad (37)$$

$$c(T) = \lambda_{ш}(T) / a_{ш}(T). \quad (38)$$

Нагрев во всех рассмотренных случаях начинался от температуры $T_n = 300$ К при размерах материала $R = 0,015$, $R_1 = 0,02$, $R_2 = 0,05$ м и параметрах внешнего теплообмена $\alpha = 30$ Вт/(м²·К) и $T_{oc} = 300$ К.

Температурное поле усеченного цилиндра для всех вариантов рассчитывалось при $q = 60$ кВт/м², как в [6].

На рис. 3, 4 приведены результаты расчета при $q_2 = q = 60$ (кВт/м²) = пост.

Величина потока теплоты $q_{3п}$ через 1400 с достигла 20 кВт/м² (1/3 от величины $q_2 = 60$), а температуры обогреваемых поверхностей ($X = 1$) цилиндра и кольца – 1450 и 1240 К (рис. 3). Естественно, из-за потерь теплоты в окружающую среду температура поверхности кольца оказалась ниже.

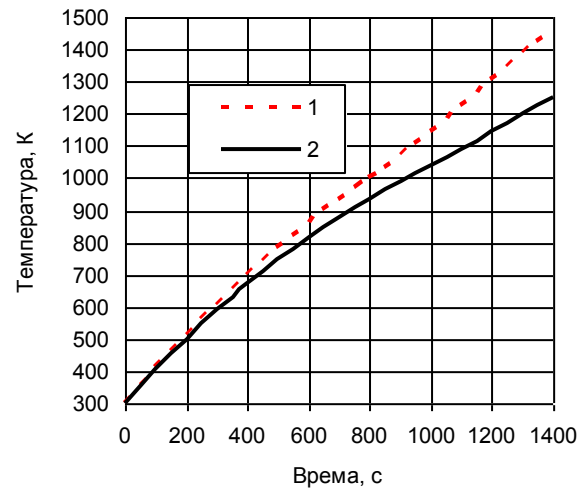


Рис. 3. Зависимости температур обогреваемых поверхностей ($X = 1$) от времени нагрева: 1 – под дисковым нагревателем; 2 – под кольцевым охранным нагревателем $T_2(X = 1, Y = 0)$

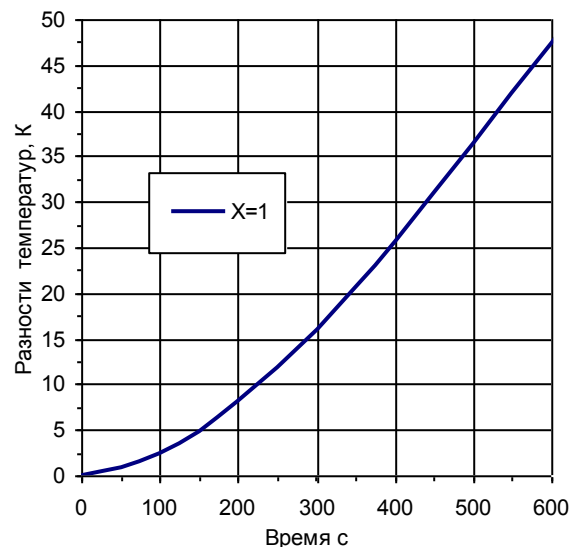


Рис. 4. Разности температур на поверхности $X = 1$ окружности образующей 4 (см. рис. 2) цилиндра и кольца

Разности температур (рис. 4) в точках $X = 0$, $X = 1$ и среднемассовой температуры на образующей цилиндра и кольца 4 (см. рис. 2) оказались одинаковыми, поэтому на рис. 4 показана температура только поверхности $X = 1$ на окружности образующей. На рис. 4 видно, что разности температур довольно быстро возрастают по мере нагрева. При $\tau > 500$ с они составляют более 35 К.

Следовательно, на границе цилиндра и кольца при $q_2 = 60$ кВт/м² адиабатные условия не соблюдались.

Выполнен расчет при увеличении мощности охранный нагревателя q_2 с учетом потерь в окружающую среду $q_2 = q - q_{3п}$. По мере роста потерь q_3 величину потока теплоты q_2 за время нагрева 1400 с пришлось увеличить с 60 до 85 кВт/м². Температуры обогреваемых поверхностей цилиндра и кольца за

время 1400 с достигли примерно одинаковых значений около 1450 К.

Разности температур (рис. 5) $X = 0$, $X = 1$ и среднемассовой температуры на образующей 4 (рис. 2) в данном случае оказались значительно меньше, чем при нагреве, когда $q_2 = q$. К моменту времени $\tau = 1400$ с температуры кольца были ниже температур цилиндра: при $X = 0$ на 5 К; при $X = 1$ на 11,5 К.

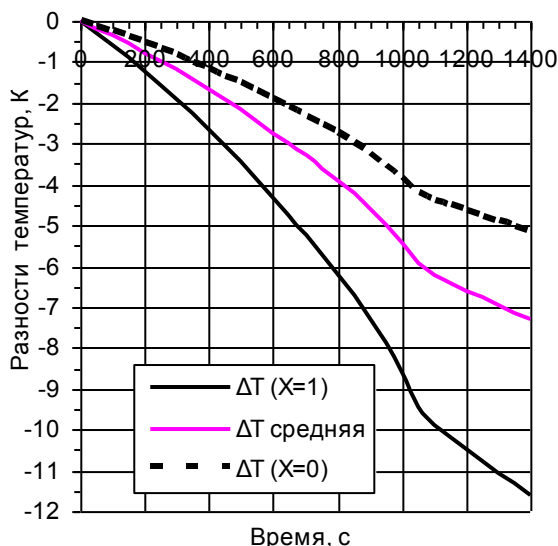


Рис. 5. Разности температур на окружности образующей 4 (см. рис. 2) цилиндра и кольца при мощности охранного нагревателя $q_2 = q - q_{3п}$ для $X = 1$; $X = 0$ и для среднемассовой температуры

Следовательно, на границе цилиндра и кольца при $q_2 = q_1 - q_{3п}$ адиабатные условия также не соблюдались.

В патенте [7] указано, что величину q_2 следует устанавливать (регулировать) по условию равенства температур цилиндра и кольца при $X = 1$.

Подбор q_2 удалось запрограммировать в программе ADIAB путем организации циклической ссылки и расчета a_2 и a_0 для кольца по формулам:

$$a_2 = q_2 R / (2\lambda); \quad (39)$$

$$a_0 = T_1(X=1) - a_2. \quad (40)$$

Интересно, что потоки теплоты q_2 и $q_{3п}$ незначительно отличались от предыдущего расчета. Температуры цилиндра и кольца при $X = 1$, естественно, были одинаковыми. Разность температур на оси $X = 0$ (рис. 6) уменьшилась и для $\tau = 1400$ с составила 6,5 К, а для среднемассовых температур — 4,3 К.

Такие разности кажутся незначительными при нагреве до 1450 К, однако при решении обратных задач теплопроводности, когда для определения ТФХ используются перепады температур 20–30 К [6], относительные погрешности могут превысить 15 % и будут недопустимы.

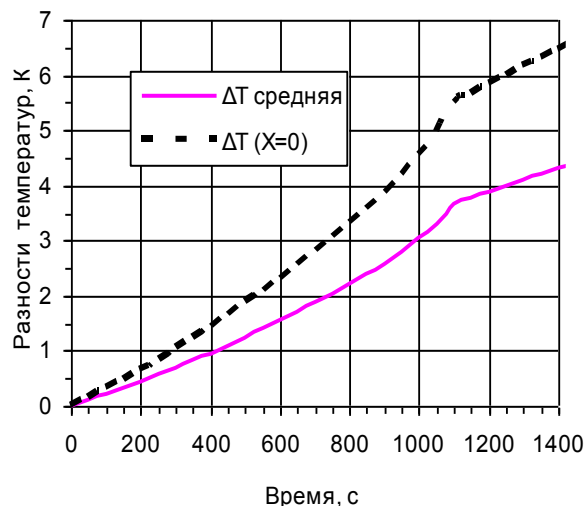


Рис. 6. Разности температур на окружности образующей 4 (см. рис. 2) цилиндра и кольца для $X = 0$ и среднемассовой температуры при мощности охранного нагревателя $q_2 = q - q_{3п}$, обеспечивающей равенство $T_2(X=1, Y=0) = T_1(X=1)$

Снижение погрешности задания адиабаты можно добиться за счет изоляции наружной поверхности кольца с координатами $[X, Y=1]$, увеличения радиуса R_2 , сокращения времени эксперимента.

В качестве примера выполнен расчет нагрева стали до температуры $T(X=1, Y=0) = 1450$ К за время $\tau = 1400$ с при задании $R_2 = 0,1$, $\alpha = 10$.

Результаты расчета приведены на рис. 7 и рис. 8. В этом случае для сохранения равенства температур $T(X=1)$ цилиндра и кольца поток теплоты q_2 потребовалось увеличить с 60 до 63,5 кВт/м². При этом разность температур $T(X=0)$ за время $\tau = 1400$ с увеличилась всего лишь с 0 К до 1 К (рис. 7).

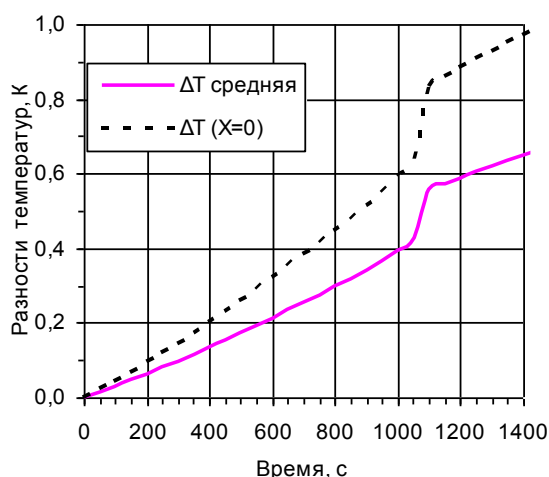


Рис. 7. Разности температур на окружности образующей 4 (см. рис. 2) цилиндра и кольца с радиусом $R_2 = 0,1$ м для $X = 0$ и среднемассовой температуры при мощности охранного нагревателя $q_2 = q - q_{3п}$, обеспечивающей равенство $T_2(X=1, Y=0) = T_1(X=1)$

На рис. 8. показано распределение температур по толщине стали $R = 0,015$ м на образующей 4 (см. рис. 2) цилиндра $T(X)$ и кольца $T(X=1, Y=0)$. Видно, что разница температур по мере удаления от нагревателей увеличивается от 0 до 1 К.

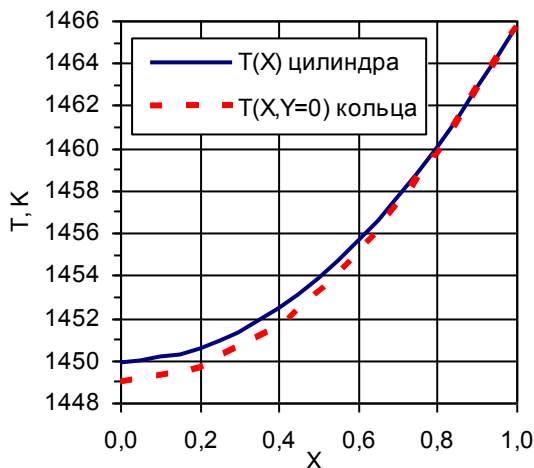


Рис. 8. Распределение температур на образующей 4 (см. рис. 2) цилиндра $T(X)$ и кольца $T(X=1, Y=0)$ в момент времени $\tau = 1400$ с

Таким образом, показана возможность подбора условий теплообмена, при которых с некоторой погрешностью пластину можно считать неограниченной.

Отметим, что создание абсолютной адиабаты таким способом в принципе невозможно, поскольку распределения температур $T(X, Y=0)$ на образующей 4 (см. рис. 2) цилиндра и кольца создаются разными потоками теплоты q и q_2 , причем всегда $q_2 > q_1$ (34). Этот вывод можно считать очевидным. Однако моделирование позволило оценить возможные погрешности измерения параметров одномерных температурных полей пластины при создании адиабатных условий с помощью охранных нагревателей.

Выводы. Разработанная численно-аналитическая модель для исследования работы кольцевого охрannого нагревателя для создания адиабатных условий на образующей цилиндрической поверхности цилиндра и исследование нескольких режимов задания мощности охрannого нагревателя позволили установить, что ни один из режимов не может создать условия идеальной адиабаты.

Показано, что путем численного эксперимента по предложенной или другой математической модели и программе можно подобрать параметры физического эксперимента, при которых с некоторой удовлетворительной погрешностью температурное поле усеченного цилиндра можно будет считать одномерным и использовать решения дифференциального уравнения теплопроводности для неограниченной пластины.

Список литературы

1. **Определение** теплофизических свойств материалов металлургического производства / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.И. Матюхин, О.Ю. Шешуков. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 180 с.
2. **Фокин В.М., Чернышев В.Н.** Неразрушающий контроль теплофизических характеристик строительных материалов. – М.: Изд-во «Машиностроение-1», 2004. – 212 с.
3. **Жуков Н.П., Майникова Н.Ф.** Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий. – М.: Изд-во «Машиностроение-1», 2004. – 288 с.
4. **Grysa Kr.** Inverse heat conduction problems // Heat Conduction – Basic Research. Intech Open. URL: <https://www.intechopen.com/books/heat-conduction-basic-research/inverse-heat-conduction-problems>.
5. **Соколов А.К.** Метод определения температуропроводности и коэффициента теплопроводности по температурам поверхности пластины как полуограниченного тела // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2022. – Т. 65, № 1. – С. 57–65. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-57-65>
6. **Метод** комплексного определения зависимости теплофизических характеристик металла от температуры решением обратной задачи теплопроводности / А.К. Соколов, В.П. Жуков, Н.Н. Смирнов, Н.Н. Ярунина // Вестник ИГЭУ. – 2024. – Вып. 6. – С. 23–30.
7. **Пат. № 2247363** Российская Федерация МПК G01N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик изделий из металлополимеров / Б.Г. Варфоломеев, Н.П. Жуков, Д.Ю. Муромцев, З.М. Селиванова; опубл. 27.02.2005, Бюл. № 6.
8. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
9. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
10. **Соколов А.К.** Математическое моделирование нагрева металла в газовых печах. – Иваново, 2011. – 396 с.
11. **Описание** изобретения к авторскому свидетельству № 399011 СССР М. Кл. F28f 13/02. Способ создания адиабатных условий на одной из поверхностей стенки / А.Ш. Дорфман, О.И. Диденко; опубл. 03.10.1973, Бюл. № 39.
12. **Соколов А.К.** Приемы проектирования тестов для программ, рассчитывающих температурные поля // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1987. – № 7. – С. 144–147.
13. **Карслоу Г., Егер Д.** Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
14. **Пехович А.И., Жидких В.М.** Расчеты теплового режима твердых тел. – Л.: Энергия, 1968. – 304 с.

References

1. Yur'ev, B.P., Gol'tsev, V.A., Matyukhin, V.I., Sheshukov, O.Yu. *Opredelenie teplofizicheskikh svoystv materialov metallurgicheskogo proizvodstva* [Determination of thermophysical properties of materials for metal-

lurgical production]. Ekaterinburg: ООО «UIPTs», 2014. 180 p.

2. Fokin, V.M., Chernyshev, V.N. *Nerazrushayushchiy kontrol' teplofizicheskikh kharakteristik stroitel'nykh materialov* [Non-destructive testing of thermal and physical characteristics of building materials]. Moscow: Izdatel'stvo «Mashinostroenie-1», 2004. 212 p.

3. Zhukov, N.P., Maynikova, N.F. *Mnogomodel'nye metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoystv materialov i izdeliy* [Multi-model methods and means of non-destructive testing of thermophysical properties of materials and products]. Moscow: Izdatel'stvo «Mashinostroenie-1», 2004. 288 p.

4. Grysa, Kr. Inverse heat conduction problems // Heat Conduction – Basic Research. Intech Open. Available at: <https://www.intechopen.com/books/heat-conduction-basic-research/inverse-heat-conduction-problems>.

5. Sokolov, A.K. Metod opredeleniya temperaturoprovodnosti i koeffitsienta teploprovodnosti po temperaturam poverkhnosti plastiny kak poluogranichennogo tela [Method to determine thermal diffusivity and thermal conductivity coefficient based on the surface temperatures of a plate as a semi-infinite body]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya Metallurgiya*, 2022, vol. 65, no. 1, pp. 57–65. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-57-65>

6. Sokolov, A.K., Zhukov, V.P., Smirnov, N.N., Yarinina, N.N. Metod kompleksnogo opredeleniya zavisimosti teplofizicheskikh kharakteristik metalla ot temperatury resheniem obratnoy zadachi teploprovodnosti [Method for comprehensive determination of the dependence of the thermophysical characteristics of a metal on tem-

perature by solving the inverse problem of thermal conductivity]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 6, pp. 23–30.

7. Varfolomeev, B.G., Zhukov, N.P., Muromtsev, D.Yu., Selivanova, Z.M. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh kharakteristik izdeliy iz metallopolymerov* [Method of non-destructive testing of thermal characteristics of metal-polymer products]. Patent RF, no. 2247363, 2005.

8. Lykov, A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow: Izdatel'stvo «Vysshaya shkola», 1967. 600 p.

9. Isachenko, V.P. Osipova, V.A., Sukomel, A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energoizdat, 1981. 416 p.

10. Sokolov, A.K. *Matematicheskoe modelirovanie nagreva metalla v gazovykh pechakh* [Mathematical modeling of metal heating in gas furnaces]. Ivanovo, 2011. 396 p.

11. Dorfman, A.Sh., Didenko, O.I. *Sposob sozdaniya adiabatnykh usloviy na odnoy iz poverkhnostey stenki* [A method for creating adiabatic conditions on one of the wall surfaces]. *Opisanie izobreteniya k avtorskomu svidetel'stvu*, no. 399011 SSSR, 1973.

12. Sokolov, A.K. Priemy proektirovaniya testov dlya programm, rasschityvayushchih temperaturnye polya [Techniques for designing tests for programs that calculate temperature fields]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1987, no. 7, pp. 144–147.

13. Karslou, G., Eger, D. *Teploprovodnost' tverdykh tel* [Thermal conductivity of solids]. Moscow: Nauka, 1964. 488 p.

14. Pekhov, A.I., Zhidkikh, V.M. *Raschety teplovogo rezhima tverdykh tel* [Calculations of thermal regime of solids]. Leningrad: Energiya, 1968. 304 p.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

Дмитрий Николаевич Кормилицын

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: dnk@ispu.ru

Ольга Сергеевна Суханова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: suhanova-olya@mail.ru

Оценка статической устойчивости системы из двух генераторных станций с управляемой линией электропередачи по характеристическому уравнению

Авторское резюме

Состояние вопроса. Повышение пропускной способности линий электропередачи является важной задачей современной электроэнергетики. Одним из перспективных направлений в этой области является применение управляемого устройства продольной емкостной компенсации, которое оказывает существенное влияние на статическую устойчивость энергосистемы. Для оценки статической устойчивости электроэнергетических систем широко используется метод малых колебаний, который заключается в составлении дифференциальных уравнений движения системы при небольшом возмущении исходного состояния и изучении характера возникающих при этом свободных колебаний системы. В рамках этого метода ключевым этапом является составление характеристического уравнения, корни которого определяют устойчивость системы. Однако для сложных многомашинных систем, особенно с учетом автоматического регулирования возбуждения генераторов и управляемого устройства продольной емкостной компенсации, порядок характеристического уравнения весьма высокий, что затрудняет его непосредственный анализ. В связи с этим особую значимость приобретает исследование свободного члена характеристического уравнения, поскольку его знак является критически важными для определения статической аperiodической устойчивости.

Материалы и методы. Использованы методы математического моделирования электроэнергетической системы, теория дальних линий электропередачи и электромеханических переходных процессов, теория автоматического управления в электроэнергетических системах, а также методы анализа устойчивости электроэнергетических систем. В качестве инструмента моделирования применено оригинальное программное обеспечение на языке программирования C++.

Результаты. Составлена система дифференциальных уравнений, описывающая электромеханические переходные процессы в исследуемой электроэнергетической системе. На основе исходной нелинейной модели методом малых отклонений получена линеаризованная система уравнений первого приближения, учитывающая взаимное влияние генераторов, а также параметры автоматических регуляторов возбуждения и управляемого устройства продольной емкостной компенсации. Для анализа устойчивости системы сформирован характеристический определитель и получено соответствующее характеристическое уравнение восьмого порядка. Построена зависимость значений свободного члена от угла δ между векторами ЭДС двух генераторов.

Выводы. Аналитическим путем с применением численных методов доказано, что конечное выражение для свободного члена не содержит напрямую настроечные параметры автоматических регуляторов возбуждения. Полученный результат имеет важное практическое значение, так как, с одной стороны, сокращает объем требуемых символьных вычислений и упрощает математические модели, а с другой – полностью сохраняет точность и кор-

ректность оценки устойчивости системы. Совместное применение автоматических регуляторов возбуждения и устройств продольной компенсации требует согласованной настройки.

Ключевые слова: статическая устойчивость, линии электропередачи сверхвысокого напряжения, управляемое устройство продольной компенсации, автоматическое регулирование возбуждения, характеристическое уравнение, свободный член характеристического уравнения

Dmitriy Nikolayevich Kormilitsyn

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: dnk@es.ispu.ru

Olga Sergeevna Sukhanova

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: suhanova-olya@mail.ru

Assessment of static stability of a system of two generator stations with a controlled power transmission line by characteristic equation

Abstract

Background. Enhancing transmission line capacity is a critical challenge in modern power engineering. One of the promising approaches in this field involves the implementation of series compensation devices, which significantly impact power system static stability. The small-signal stability analysis method is widely employed for assessing power system stability. This technique formulates system motion differential equations under minor disturbances of the initial state and examining the resulting free oscillation patterns. A crucial step of this method is deriving the characteristic equation, which roots determine system stability. However, for complex multi-machine systems, particularly with automatic control of excitation of generators and series compensation devices, the characteristic equation becomes high-order, complicating direct analysis. Consequently, studying the characteristic equation's constant term gains particular importance, as its sign is critically significant to determine static aperiodic stability.

Materials and methods. Methods of mathematical modeling of the electric power system, the theory of long-distance power lines and electromechanical transients, automatic control theory for power systems, as well as methods of analyzing the stability of electric power systems have been used. The original software in C ++ programming language has been used as a modeling tool.

Results. A system of differential equations describing electromagnetic transients in the studied power system has been developed. Based on the initial nonlinear model, a first-approximation linearized system of equations has been obtained using the small-signal method, accounting for the mutual influence of generators as well as parameters of automatic excitation regulators and series compensation devices. To analyze the stability of the system, a characteristic determinant has been formulated and a corresponding characteristic equation of the eighth order has been obtained. The dependence of the constant term values on the angle δ between the EMFs of the two generators has been established.

Conclusions. It has been proven analytically using numerical methods that the final expression for a constant term does not directly contain the tuning parameters of the automatic excitation controllers. The obtained result has significant practical value. Since, on the one hand, it reduces the required symbolic computations and simplifies mathematical models and on the other hand, it completely maintains accuracy and validity in the system's stability assessment. The co-use of automatic excitation controllers and series compensation devices also requires coordinated tuning.

Key words: static stability, ultra-high voltage transmission lines, controlled series compensation device, automatic excitation control, characteristic equation, constant term of the characteristic equation

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.036-042

Введение. В условиях быстрого роста городов и увеличения числа потребителей электроэнергии особую актуальность приобретают технологии, позволяющие повышать пропускную способность существующих линий электропередачи (ЛЭП) без расширения инфраструктуры. Одним из перспективных направлений в электроэнергетике является применение управляемой продольной емкостной компенсации, которая обеспечивает эффективное управление параметрами сети и увеличивает передаваемую мощность без необходимости отвода дополнительных земель

под строительство новых ЛЭП [1–3]. Однако внедрение управляемой продольной компенсации требует комплексного анализа ее влияния на статическую устойчивость электроэнергетической системы (ЭЭС), особенно в условиях наличия других управляемых элементов, таких как автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) генераторов.

Основным методом оценки статической устойчивости ЭЭС является метод малых колебаний (метод малых отклонений), разработанный А.М. Ляпуновым. Ключевым этапом метода малых колебаний является анализ характери-

стического уравнения (ХУ) линеаризованной системы. Условие статической устойчивости выполняется, когда все корни ХУ имеют отрицательные вещественные части [4]. Однако в системах с применением управляемых устройств продольной компенсации (УУПК) и АРВ высокий порядок характеристического уравнения существенно усложняет процедуру определения корней. В связи с этим особое внимание уделяется анализу свободного члена ХУ, знак которого определяет статическую апериодическую устойчивость при условии положительности коэффициента при старшей степени ХУ [5]. Таким образом, целесообразно провести исследование свободного члена ХУ сложной ЭЭС с УУПК и АРВ генераторов в целях оценки влияния настроечных параметров регулируемых устройств на статическую устойчивость ЭЭС.

Материалы и методы. Модель рассматриваемой электроэнергетической системы. Исследование проведено для ЭЭС, состоящей из двух генераторных станций (рис. 1). Генераторные станции представлены в модели двумя эквивалентными синхронными генераторами с автоматическими регуляторами возбуждения, соединенными через двухцепную линию электропередачи 500 кВ с установленным в середине линии управляемым устройством продольной компенсации. Генераторы подключены к линии через повышающие трансформаторы с обеих сторон. В промежуточном узле сети расположена симметричная нагрузка. Двухцепная ЛЭП имеет равные по длине и параметрам участки до и после точки компенсации. На выводах УУПК установлены шунтирующие реакторы (ШР).

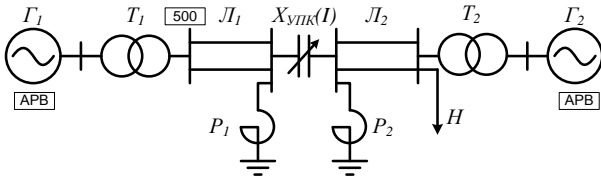


Рис. 1. Схема исследуемой электроэнергетической системы, содержащей управляемую ЛЭП СВН

Регулирование УУПК реализуется на динамическом изменении емкостного сопротивления, величина которого определяется значением тока в линии и соответствует следующему соотношению [6, 7]:

$$X_{\text{УУПК}}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_{1\text{УУПК}} - K_{2\text{УУПК}} I)}, \quad (1)$$

где $X_{\text{УУПК}}(I)$ – сопротивление УУПК, Ом; I – ток линии (в месте установки УУПК), кА; $K_{1\text{УУПК}}$, $K_{2\text{УУПК}}$ – коэффициенты УУПК, мкФ и мкФ/кА соответственно.

Уравнения электромеханического переходного процесса исследуемой системы из двух генераторных станций с регулируемым

УПК с учетом электромагнитных переходных процессов в обмотках возбуждения синхронных генераторов (СГ) и АРВ сильного действия (АРВ-СД) [8, 9] имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} T_{J1} p^2 \delta_1 + D_1 p \delta_{12} &= P_{T1} - P_{\Sigma 1}, \\ T_{J2} p^2 \delta_2 - D_2 p \delta_{12} &= P_{T2} - P_{\Sigma 2}, \\ T_{do1} p E'_{q1} + E_{q1} &= E_{qe1}, \\ T_{do2} p E'_{q2} + E_{q2} &= E_{qe2}, \\ I_{\text{УУПК}} &= f(\delta_{12}, E_{q1}, E_{q2}, X_{\text{УУПК}}), \\ X_{\text{УУПК}} &= f(I_{\text{УУПК}}), \\ E_{qe1} &= E_{qo1} + \sum_j W'_{\Pi j1}(p) \Pi_{j1}, \\ E_{qe2} &= E_{qo2} + \sum_j W'_{\Pi j2}(p) \Pi_{j2}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где T_{J1} , T_{J2} – постоянные инерции; p – оператор дифференцирования; δ_1 , δ_2 – собственные углы ЭДС СГ; δ_{12} – взаимный угол между ЭДС СГ; P_{T1} , P_{T2} – мощность турбин; $P_{\Sigma 1}$, $P_{\Sigma 2}$ – электромагнитные мощности СГ; D_1 , D_2 – коэффициенты демпфирования; E_{qo1} , E_{qo2} – начальные значения ЭДС возбуждения СГ; E_{qe1} , E_{qe2} – вынужденные составляющие ЭДС синхронных машин; T_{do1} , T_{do2} – постоянные времени обмотки возбуждения синхронных машин; E_{q1} , E_{q2} – синхронные ЭДС СГ; E'_{q1} , E'_{q2} – переходные ЭДС СГ; $W'_{\Pi j1}$, $W'_{\Pi j2}$ – передаточные функции систем возбуждения и АРВ синхронных генераторов на первой и второй электростанции соответственно, записанные в операторной форме; Π_{j1} , Π_{j2} – параметры режима, по которым проводится регулирование, в данном случае напряжения и токи первого и второго генераторов соответственно.

Передаточная функция имеет следующий вид:

$$W'_{\Pi j}(p) = \frac{1}{(1 + pT_e)(1 + pT_p)} W_{\Pi j}(p), \quad (3)$$

где T_e – постоянная времени возбудителя, с; T_p – постоянная времени регулятора, с; $W_{\Pi j}(p)$ – передаточная функция регулятора.

Выражение передаточной функции регулятора зависит от закона регулирования и типа АРВ, для АРВ-СД:

$$W_{\Pi j}(p) = K_{0U} + k_{1I} p + k_{2I} p^2, \quad (4)$$

где K_{0U} – коэффициент регулирования по отклонению напряжения генератора; k_{1I} , k_{2I} – коэффициенты регулирования АРВ-СД по первой и второй производным тока статора соответственно.

Фундаментальным свойством ЭЭС является ее нелинейность, обусловленная характеристиками синхронных машин, а также параметрами управляемых устройств. Однако при малых

отклонениях оказывается возможным линеаризовать исходную систему уравнений, приведя их к виду дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами:

$$\left. \begin{aligned}
 & p^2 \Delta \delta_{12} + p \left(\frac{D_1}{T_{J1}} + \frac{D_2}{T_{J2}} \right) \Delta \delta_{12} + \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \right) \Delta \delta_{12} + \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial E_{q1}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q1}} \right) \Delta E_{q1} + \\
 & + \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial E_{q2}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q2}} \right) \Delta E_{q2} + \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial X_{ууПК}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial X_{ууПК}} \right) \Delta X_{ууПК} = 0, \\
 & T_{d01} p \frac{\partial E'_{q1}}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + T_{d01} p \frac{\partial E'_{q1}}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} + T_{d01} p \frac{\partial E'_{q1}}{\partial E_{q2}} \Delta E_{q2} + T_{d01} p \frac{\partial E'_{q1}}{\partial X_{ууПК}} \Delta X_{ууПК} + \Delta E_{q1} - \Delta E_{qe1} = 0, \\
 & T_{d02} p \frac{\partial E'_{q2}}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + T_{d02} p \frac{\partial E'_{q2}}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} + T_{d02} p \frac{\partial E'_{q2}}{\partial E_{q2}} \Delta E_{q2} + T_{d02} p \frac{\partial E'_{q2}}{\partial X_{ууПК}} \Delta X_{ууПК} + \Delta E_{q2} - \Delta E_{qe2} = 0, \\
 & -\Delta I + \frac{\partial I}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + \frac{\partial I}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} + \frac{\partial I}{\partial E_{q2}} \Delta E_{q2} + \frac{\partial I}{\partial X_{ууПК}} \Delta X_{ууПК} = 0, \\
 & -\Delta X_{ууПК} + \frac{\partial X_{ууПК}}{\partial I} \Delta I = 0, \\
 & \frac{1}{a} \left(K_{0U1} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + c \frac{\partial I_{Г1}}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} \right) + \frac{1}{a} \left(K_{0U1} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} + c \frac{\partial I_{Г1}}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} \right) + \\
 & + \frac{1}{a} \left(K_{0U1} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial X_{ууПК}} \Delta X_{ууПК} + c \frac{\partial I_{Г1}}{\partial X_{ууПК}} \Delta X_{ууПК} \right) + \frac{1}{a} \left(K_{0U1} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial E_{q2}} \Delta E_{q2} + c \frac{\partial I_{Г1}}{\partial E_{q2}} \Delta E_{q2} \right) - \Delta E_{qe1} = 0, \\
 & \frac{1}{b} \left(K_{0U2} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + d \frac{\partial I_{Г2}}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} \right) + \frac{1}{b} \left(K_{0U2} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial E_{q2}} \Delta E_{q2} + d \frac{\partial I_{Г2}}{\partial E_{q2}} \Delta E_{q2} \right) + \\
 & + \frac{1}{b} \left(K_{0U2} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial X_{ууПК}} \Delta X_{ууПК} + d \frac{\partial I_{Г2}}{\partial X_{ууПК}} \Delta X_{ууПК} \right) + \frac{1}{b} \left(K_{0U2} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} + d \frac{\partial I_{Г2}}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} \right) - \Delta E_{qe2} = 0.
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Следует упомянуть, что, согласно исследованиям А.М. Ляпунова, учет нелинейности не влияет на оценку устойчивости [10]. Замена нелинейной системы линейной (линеаризованной) производится путем разложения уравнений в ряды Тейлора с сохранением линейных членов и отбра-

сывания членов высших порядков, которые для малых отклонений считаются пренебрежимо малыми [11, 12]. Коэффициенты при малых отклонениях переменных ($\Delta \delta_{12}$, ΔE_{q1} , ΔE_{q2} , $\Delta X_{ууПК}$, ΔE_{qe1} , ΔE_{qe2} , ΔI), полученные при линеаризации, формируют характеристический определитель:

$$D(p) = \begin{bmatrix}
 p^2 + p \left(\frac{D_1}{T_{J1}} + \frac{D_2}{T_{J2}} \right) + \left(\frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} \right) & \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q1}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial E_{q1}} & \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q2}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial E_{q2}} & \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial X_{ууПК}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial X_{ууПК}} & 0 & 0 & 0 \\
 p T_{d01} \frac{\partial E'_{q1}}{\partial \delta_{12}} & p T_{d01} \frac{\partial E'_{q1}}{\partial E_{q1}} + 1 & p T_{d01} \frac{\partial E'_{q1}}{\partial E_{q2}} & p T_{d01} \frac{\partial E'_{q1}}{\partial X_{ууПК}} & -1 & 0 & 0 \\
 p T_{d02} \frac{\partial E'_{q2}}{\partial \delta_{12}} & p T_{d02} \frac{\partial E'_{q2}}{\partial E_{q1}} & p T_{d02} \frac{\partial E'_{q2}}{\partial E_{q2}} + 1 & p T_{d02} \frac{\partial E'_{q2}}{\partial X_{ууПК}} & 0 & -1 & 0 \\
 \frac{\partial I_{ууПК}}{\partial \delta_{12}} & \frac{\partial I_{ууПК}}{\partial E_{q1}} & \frac{\partial I_{ууПК}}{\partial E_{q2}} & \frac{\partial I_{ууПК}}{\partial X_{ууПК}} & 0 & 0 & \frac{\partial X_{ууПК}}{\partial I_{ууПК}} \\
 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\
 \frac{K_{0U1} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial \delta_{12}} + c \frac{\partial I_{Г1}}{\partial \delta_{12}}}{a} & \frac{K_{0U1} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial E_{q1}} + c \frac{\partial I_{Г1}}{\partial E_{q1}}}{a} & \frac{K_{0U1} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial E_{q2}} + c \frac{\partial I_{Г1}}{\partial E_{q2}}}{a} & \frac{K_{0U1} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial X_{ууПК}} + c \frac{\partial I_{Г1}}{\partial X_{ууПК}}}{a} & -1 & 0 & 0 \\
 \frac{K_{0U2} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial \delta_{12}} + d \frac{\partial I_{Г2}}{\partial \delta_{12}}}{b} & \frac{K_{0U2} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial E_{q1}} + d \frac{\partial I_{Г2}}{\partial E_{q1}}}{b} & \frac{K_{0U2} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial E_{q2}} + d \frac{\partial I_{Г2}}{\partial E_{q2}}}{b} & \frac{K_{0U2} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial X_{ууПК}} + d \frac{\partial I_{Г2}}{\partial X_{ууПК}}}{b} & 0 & -1 & 0
 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $U_{Г1}$, $I_{Г1}$, $U_{Г2}$, $I_{Г2}$ – напряжения и токи первого и второго генераторов соответственно; k_{11} , k_{21} – коэффициенты регулирования АРВ-СД для первого генератора; k_{12} , k_{22} – коэффициенты регулирования АРВ-СД для второго генератора;

$$a = (p T_{e1} + 1)(p T_{p1} + 1), \quad b = (p T_{e2} + 1)(p T_{p2} + 1), \\
 c = p(k_{11} + p k_{21}), \quad d = p(k_{12} + p k_{22}).$$

Частные производные в (5) и (6) зависят от режима и отражают нелинейные свойства электрической системы в линеаризованных

уравнениях. Для рассматриваемой системы частные производные определены численным расчетом как отношения соответствующих приращений по полной математической модели, реализованной в программном комплексе на языке программирования C++.

Характеристическое уравнение, полученное из определителя (6), имеет вид

$$a_0 p^8 + a_1 p^7 + a_2 p^6 + a_3 p^5 + a_4 p^4 + a_5 p^3 + a_6 p^2 + a_7 p + a_8 = 0, \quad (7)$$

где p – переменная уравнения; a_0 – a_7 – коэффициенты ХУ; a_8 – свободный член ХУ.

Критерием апериодической статической устойчивости является положительность свободного члена ХУ ($a_8 > 0$). Предельный по апериодической статической устойчивости режим характеризуется обращением свободного члена ХУ в нуль ($a_8 = 0$) [13, 14].

Результаты исследования. Свободный член ХУ рассматриваемой системы в аналитическом представлении содержит свыше пятидесяти слагаемых, большинство из которых содержат настроечные параметры АРВ первого и второго генераторов (K_{0U1} , K_{0U2}). Если предположить, что данные коэффициенты равны нулю ($K_{0U1} = K_{0U2} = 0$), то выражение свободного члена ХУ существенно упрощается и сводится к известному виду:

$$a_8 = \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \right) - \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \right) \frac{\partial I}{\partial X_{УУПК}} \frac{\partial X_{УУПК}}{\partial I} + \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial X_{УУПК}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial X_{УУПК}} \right) \frac{\partial I}{\partial \delta_{12}} \frac{\partial X_{УУПК}}{\partial I}. \quad (8)$$

Однако в ходе вычислительного эксперимента установлено, что при ненулевых значениях коэффициентов регулирования АРВ генераторов значения свободного члена ХУ полностью совпадают с результатами, полученными по упрощенной формуле (8). Данное явление объясняется взаимным уничтожением слагаемых в полном аналитическом выражении, обусловленным его знакопеременной структурой. В качестве иллюстрации рассмотрена пара слагаемых из полного аналитического выражения свободного члена ХУ, в которых выделены составляющие, имеющие различия:

$$-K_{0U1} K_{0U2} T_{J1} \frac{\partial I}{\partial E_{q1}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q2}} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial X_{УУПК}} \frac{\partial X_{УУПК}}{\partial I} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial \delta_{12}} + K_{0U1} K_{0U2} T_{J1} \frac{\partial I}{\partial E_{q1}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q2}} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial X_{УУПК}} \frac{\partial X_{УУПК}}{\partial I} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial \delta_{12}}. \quad (9)$$

Однако при детальном рассмотрении данных различий видно, что они оказываются тождественными:

$$\frac{\partial U_{Г1}}{\partial X_{УУПК}} \frac{\partial U_{Г2}}{\partial \delta_{12}} = \frac{U_{Г1} - U_{Г10}}{X_{УУПК} - X_{УУПК0}} \frac{U_{Г2} - U_{Г20}}{\delta_{12} - \delta_{120}}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial U_{Г2}}{\partial X_{УУПК}} \frac{\partial U_{Г1}}{\partial \delta_{12}} = \frac{U_{Г2} - U_{Г20}}{X_{УУПК} - X_{УУПК0}} \frac{U_{Г1} - U_{Г10}}{\delta_{12} - \delta_{120}}. \quad (11)$$

В результате наблюдается полная взаимная компенсация рассматриваемой пары слагаемых.

Таким образом, свободный член характеристического уравнения не зависит от параметров регуляторов возбуждения. Это позволяет применять упрощенную формулу расчета (8), обеспечивающую идентичные с полным выражением результаты, но требующую значительно меньших вычислительных затрат. Данное упрощение особенно полезно при анализе устойчивости сложных энергосистем, так как сохраняет точность расчетов при существенном снижении их трудоемкости.

На рис. 2, 3 представлены кривые изменения значений свободного члена ХУ для исследуемой системы при различных настроечных параметрах УУПК и АРВ соответственно. Совместное регулирование АРВ и УУПК отражается на изменении значения свободного члена ХУ, по смене знака которого можно судить об апериодической статической устойчивости. Наличие только одного регулируемого устройства (АРВ или УУПК) дает самый низкий предел по статической апериодической устойчивости (рис. 2, 3). В то же время при наличии АРВ генераторов увеличение коэффициента регулирования УУПК ($K_{2УУПК}$) приводит к тому, что смена знака свободного члена ХУ происходит при меньших значениях взаимного угла δ_{12} (рис. 2). С другой стороны, увеличение коэффициентов регулирования АРВ при наличии УУПК также приводит к уменьшению взаимного угла, при котором происходит нарушение статической апериодической устойчивости.

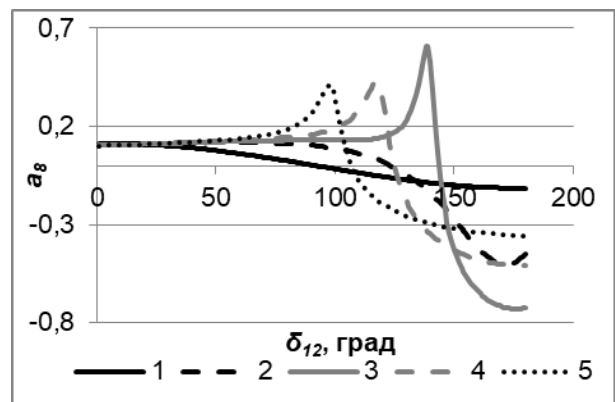


Рис. 2. Кривые изменения значений свободного члена a_8 ХУ рассматриваемой системы для различных законов регулирования УУПК: 1 – $K_{2УУПК} = 5$ без АРВ; 2 – $K_{2УУПК} = 3$ с АРВ; 3 – $K_{2УУПК} = 5$ с АРВ; 4 – $K_{2УУПК} = 7$ с АРВ; 5 – $K_{2УУПК} = 10$ с АРВ

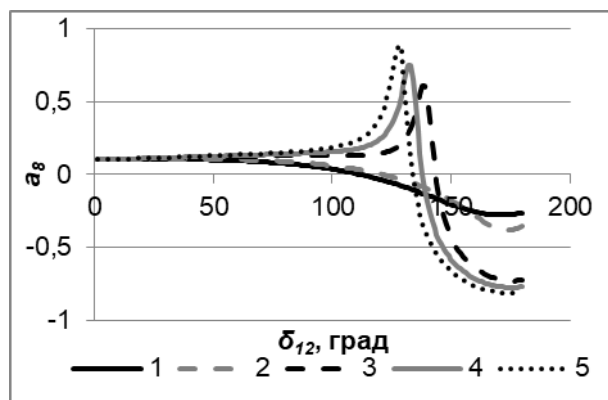


Рис. 3. Кривые изменения значений свободного члена a_0 ХУ рассматриваемой системы для различных законов регулирования АРВ: 1 – $K_{0U1} = K_{0U2} = 2$ без УУПК; 2 – $K_{0U1} = K_{0U2} = 2$ с УУПК; 3 – $K_{0U1} = K_{0U2} = 5$ с УУПК; 4 – $K_{0U1} = K_{0U2} = 7$ с УУПК; 5 – $K_{0U1} = K_{0U2} = 10$ с УУПК

Выводы. В ходе вычислительных экспериментов установлено, что свободный член характеристического уравнения не зависит от настроечных параметров АРВ генераторов. Это дает возможность применения упрощенной расчетной формулы, которая полностью эквивалентна исходному выражению с точки зрения точности результатов. Для сложных многомашинных ЭЭС повышение вычислительной эффективности, связанное с применением выражения, аналогичного (8), может оказаться очень существенным.

Увеличение коэффициентов регулирования как УУПК ($K_{2УУПК}$), так и АРВ генераторов (K_{0U1} , K_{0U2}) приводит к уменьшению значения взаимного угла δ_{12} , при котором происходит нарушение статической аperiodической устойчивости. Однако эти значения углов остаются существенно выше характерных для нормальных режимов работы энергосистемы. Кроме того, наименьший предел по статической аperiodической устойчивости наблюдается при использовании только одного регулирующего устройства (АРВ или УУПК), что указывает на целесообразность их совместного применения. Однако полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейших исследований совместного регулирования АРВ и УУПК для определения оптимальных соотношений между коэффициентами регулирования АРВ и УУПК, а также взаимодействия регулирующих устройств в переходных режимах, так как представленные результаты относятся к статической устойчивости.

Список литературы

1. Антонов А.В., Фокин В.К., Тузлукова Е.В. О применении устройств продольной емкостной компенсации в высоковольтных электрических сетях России // Энергия единой сети. – 2016. – Вып. 6(29). – С. 26–43.

2. Кочкин В.И. Новые технологии повышения пропускной способности ЛЭП // Новое в российской электроэнергетике. – 2010. – № 8. – С. 5–16.

3. Луковенко А.С. Анализ отечественного и мирового опыта применения управляемых электропередач переменного тока в интеллектуальных электрических сетях // Энергия единой сети. – 2018. – № 5(41). – С. 30–38.

4. Братолубов А.А. Физические основы переходных процессов в электроэнергетических системах: учеб. пособие / ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2018. – 184 с.

5. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

6. Голов В.П. Применение регулируемой компенсации линии электропередач // Изв. вузов. Энергетика. – 1978. – № 6. – С. 3–8.

7. Использование управляемых линий электропередачи с регулируемой последовательной компенсацией для реализации адаптивных сетей / В.П. Голов, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин, Д.Н. Кормилицин // Российская Электротехника. – Февраль 2017. – Т. 88, вып. 2. – С. 60–66.

8. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие. – М.: Омега-Л, 2013. – 384 с.

9. Москвин И.А. Колебательная статическая устойчивость электроэнергетической системы с межсистемной связью, содержащей регулируемое устройство продольной компенсации // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 5. – С. 46–50.

10. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 455 с.

11. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. лит., 1972. – 768 с.

12. Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Методы исследования устойчивости нелинейных систем. – 4-е изд., доп. – Иваново, 2025. – 104 с.

13. Веников В.А., Жуков Л.А., Поспелов Г.Е. Режимы работы электрических систем и сетей: учеб. пособие / под ред. С.М. Оводова. – М.: Высш. шк., 1975. – 343 с.

14. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 488 с.

References

1. Antonov, A.V., Fokin, V.K., Tuzlukova, E.V. O primeneniі ustroystv prodol'noy emkostnoy kompensatsii v vysokovol'tnykh elektricheskikh setyakh Rossii [On application of longitudinal capacitive compensation devices in high-voltage electrical networks of Russia]. *Energiya edinoi seti*, 2016, issue 6(29), pp. 26–43.

2. Kochkin, V.I. Novye tekhnologii povysheniya propusknoy sposobnosti LEP [New technologies for increasing the transmission capacity of power lines]. *Novoe v rossiyskoy elektroenergetike*, 2010, no. 8, pp. 5–16.

3. Lukovenko, A.S. Analiz otechestvennogo i mirovogo opyta primeneniya upravlyaemykh elektroperedach peremennogo toka v intellektual'nykh elektricheskikh setyakh [Analysis of domestic and inter-

national experience of application of controlled AC power transmission in smart grids]. *Energiya edinoi seti*, 2018, no. 5(41), pp. 30–38.

4. Bratolyubov, A.A. *Fizicheskie osnovy perekhodnykh protsessov v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Physical basis of transient processes in electric power systems]. Ivanovo, 2018. 184 p.

5. Venikov, V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromechanical transients in electric systems]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985. 536 p.

6. Golov, V.P. *Primenenie reguliruemoy kompensatsii linii elektroperedach* [Application of Power Line Adjustable Compensation]. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1978, no. 6, pp. 3–8.

7. Golov, V.P., Martirosyan, A.A., Moskvina, I.A., Kormilitsyn, D.N. *Ispol'zovanie upravlyaemykh liniy elektroperedachi s reguliruemoy posledovatel'noy kompensatsiei dlya realizatsii adaptivnykh setey* [Using controlled electric-power lines with controlled series compensation in smart-grid networks]. *Rossiyskaya Elektrotehnika*, February 2017, vol. 88, issue 2, pp. 60–66.

8. Kulikov, Yu.A. *Perekhodnye protsessy v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Transient processes in electric power systems]. Moscow: Omega-L, 2013. 384 p.

9. Moskvina, I.A. *Kolebatel'naya staticheskaya ustoychivost' elektroenergeticheskoy sistemy s mezhsistemnoy svyaz'yu, soderzhashchey reguliruemoe ustroystvo prodol'noy kompensatsii* [Oscillatory static stability of an electric power system with intersystem coupling containing an adjustable series compensation device]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 5, pp. 46–50.

10. Zhdanov, P.S. *Voprosy ustoychivosti elektricheskikh sistem* [The issues of electrical system stability]. Moscow: Energiya, 1979. 455 p.

11. Besekerskiy, V.A., Popov, E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Theory of automatic control systems]. Moscow: Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1972. 768 p.

12. Tararykin, S.V., Tyutikov, V.V. *Metody issledovaniya ustoychivosti nelineynykh sistem* [Methods for studying the stability of nonlinear systems]. Ivanovo, 2025. 104 p.

13. Venikov, V.A., Zhukov, L.A., Pospelov, G.E. *Rezhimy raboty elektricheskikh sistem i setey* [Operating modes of electrical systems and networks]. Moscow: Vysshaya shkola, 1975. 343 p.

14. Ryzhov, Yu.P. *Dal'nie elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya* [Long-range transmission of ultra-high voltage]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2007. 488 p.

УДК 621.3.045.56

Павел Викторович Яковлев

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и теплоэнергетики, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: yakovlev_pv@pers.spmi.ru

Илья Николаевич Сулыненков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, проректор по научной работе, Россия, Иваново, e-mail: sulynenkov.in@ispu.ru

Обоснование возможности диагностики межвиткового короткого замыкания обмотки асинхронного электродвигателя применением тепловизионной съемки

Авторское резюме

Состояние вопроса. Анализ дефектов асинхронных электродвигателей показывает, что одной из основных причин выхода их из строя являются межвитковые короткие замыкания обмоток статоров. Существующие системы диагностики для выявления этого дефекта преимущественно требуют остановки оборудования или разборки электродвигателя для непосредственной дефектовки обмоток. Среди методов оперативного контроля в настоящее время используется метод тепловизионной съемки, но отсутствует методика выявления межвиткового короткого замыкания на начальном его этапе, когда локальные тепловыделения относительно невелики. В связи с этим исследования поверхностных локальных аномалий температуры, возникающих на начальном этапе появления межвитковых коротких замыканий в обмотке статора, обоснование возможности их надежного выявления с помощью тепловизионной съемки, определение требуемой чувствительности тепловизора и разработка рекомендаций по проведению обследования являются актуальными.

Материалы и методы. Для определения механизма и закономерностей формирования температурного поля на поверхности асинхронного электродвигателя и выявления межвитковых коротких замыканий применением тепловизионного контроля использован метод численного моделирования теплообмена с верификацией результатов по существующим термограммам.

Результаты. Выявлены закономерности формирования температурных полей и аномалии температур на поверхности корпуса асинхронного электродвигателя при межвитковом коротком замыкании обмотки статора. Предложен метод достоверного определения и локализации межвиткового короткого замыкания обмотки статора по анализу температурного поля термограммы с оценкой величины тепловыделения в обмотке, позволяющий выявить дефект на ранних стадиях.

Выводы. Предложенная методика проведения тепловизионной съемки асинхронного электродвигателя и анализа полученной термограммы может быть использована для раннего обнаружения межвитковых замыканий в статоре двигателя, позволяет существенно сократить трудозатраты на поиск неисправностей электродвигателей и в сочетании с другими существующими методами диагностирования эффективно и своевременно планировать ремонты энергетического оборудования и повышать его энергоэффективность.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, межвитковое короткое замыкание, тепловизионная съемка, численное моделирование, температурное поле

Pavel Viktorovich Yakovlev

Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Heat Engineering and Thermal Power Engineering Department, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: yakovlev_pv@pers.spmi.ru

Ilya Nikolaevich Sulynenkov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor, Vice-Rector for Research, Russia, Ivanovo, e-mail: sulynenkov.in@ispu.ru

Justification of the possibility to diagnose an inter-turn short circuit in the winding of an asynchronous electric motor using thermal imaging

Abstract

Background. An analysis of asynchronous electric motor defects shows that interturn short circuits in the stator windings are one of the main causes of their failure. Existing diagnostic systems to detect this defect primarily require shutting down the equipment or disassembling the electric motor for detection of defects of the windings. Thermal imaging is currently used as

an operational monitoring method, but there is no method to detect interturn short circuits at their initial stage, when localized heat generation is relatively low. Therefore, it is relevant to study localized surface temperature anomalies that occur at the initial stage of interturn short circuits in the stator winding, to justify their reliable detection using thermal imaging, to determine the required thermal imager sensitivity, and to develop recommendations on inspection.

Materials and methods. The authors have used a method of numerical modeling of heat exchange with verification of the results using existing thermograms to determine the mechanism and patterns of formation of the temperature field on the surface of an asynchronous electric motor and to identify interturn short circuits using thermal imaging control.

Results. Patterns of the formation of temperature fields and temperature anomalies on the surface of an asynchronous electric motor housing during interturn short circuits in the stator winding have been identified. The authors have proposed a method to detect and localize interturn short circuits in the stator winding by analyzing the temperature field of a thermogram and assessing the amount of heat generated in the winding, enabling early detection of the defect.

Conclusions. The proposed method to conduct thermal imaging of an asynchronous electric motor and analyze the resulting thermogram can be used for early detection of interturn short circuits in the motor stator. It allows us significantly reduce labor costs for troubleshooting electric motors and, in combination with other existing diagnostic methods, effectively and timely plan maintenance of power equipment and increase its energy efficiency.

Key words: asynchronous electric motor, interturn short circuit, thermal imaging, numerical modeling, temperature field

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.043-050

Введение. Своевременное выявление межвиткового короткого замыкания обмоток электродвигателя позволяет снизить ущерб от аварийного отключения оборудования и выполнить своевременный ремонт [1–3]. Для диагностики короткого замыкания применяются различные методы [4–6], но для большинства из них требуется остановка оборудования или разборка электродвигателя. Большинство работ в области диагностики состояния обмоток посвящено методам контроля электромагнитного поля [7–9], параметров сети [10–12] или комбинированных методов [13–15], в том числе с использованием интеллектуальных нейросетей [16–18] и основанных на создании цифровых двойников электродвигателей или трансформаторов [19–21]. Анализ работ [22–24] показал, что теоретическому обоснованию тепловизионного контроля уделяется, на наш взгляд, недостаточное внимание, в то время как его активно используют в практике диагностики оборудования [25]. Широкое распространение тепловизоров и снижение их стоимости позволяют организовать на большинстве объектов тепловизионное обследование работающего оборудования. В настоящее время тепловизионное обследование преимущественно выполняется для выявления неисправностей подшипникового узла, перегрева контактных участков и перегрузки оборудования (рис. 1).

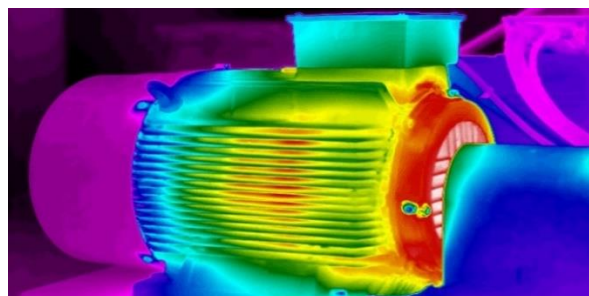


Рис. 1. Термограмма электродвигателя [25]

При возникновении межвиткового короткого замыкания, когда тепловыделение достаточно мало, его выявление и локализация могут

маскироваться неравномерностью температурного поля электродвигателя. Оценка возможности выявления подобных неисправностей в пределах границ чувствительности тепловизионной картинки и является предметом исследования.

Метод исследования. В основу исследования положен метод численного моделирования с верификацией результатов по существующим данным тепловизионного обследования и зонам вероятного возникновения межвиткового замыкания. Для этого разработана 3d-модель асинхронного электродвигателя мощностью 3 кВт, включающая орбренный корпус, статор с контрольной обмоткой, переднюю и заднюю крышки электродвигателя с подшипниками, вращающийся ротор, крыльчатку системы охлаждения. При создании модели сделаны некоторые геометрические допущения, незначительно влияющие на температурное поле на поверхности корпуса электродвигателя. Из допущений, требующих проверки в дальнейших исследованиях, следует отметить допущение о равномерности тепловыделения по длине обмотки. Также при создании модели учтен лучистый теплообмен – принята степень черноты 0,95, характерная для окрашенных и загрязненных поверхностей. Расчеты выполнены для температуры окружающей среды 20 °С. Общий вид модели представлен на рис. 2.

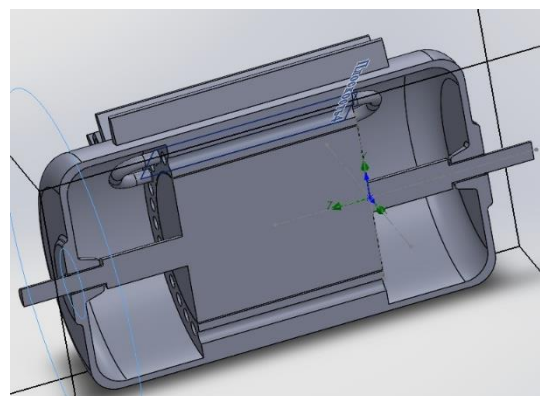


Рис. 2. 3d-модель асинхронного электродвигателя

Результаты исследования. Основной целью исследования являлось определение отклонения температурного поля поверхности корпуса электродвигателя при локальном перегреве, вызванном коротким замыканием в тестовой обмотке. Факторами, влияющими на температурное поле, являются: рассеивание теплового потока в статоре, корпусе, включая его ребренную часть; вынужденная конвекция внутри электродвигателя, вызванная вращением ротора; неравномерность распределения коэффициента теплоотдачи при внешнем обдуве электродвигателя.

На рис. 3 представлено распределение коэффициента теплоотдачи по поверхности электродвигателя. Анализируя полученные результаты, можно отметить их сходимость с результатом тепловизионного обследования (рис. 1). Наиболее холодной частью является зона вблизи кожуха крыльчатки, а наиболее горячей – зона с минимальным коэффициентом теплоотдачи вблизи вала. Поверхность корпуса между ребрами имеет наименьший коэффициент теплоот-

дачи (рис. 3), на основании чего эта зона представляется наиболее перспективной для выявления маломощных источников теплоты, таких как межвитковые замыкания на начальном этапе их развития.

Воздух внутри электродвигателя обдувает ротор (рис. 4), но анализ его движения показывает относительно малые скорости движения вблизи выхода обмотки из статора, что подтверждается перегревом обмотки в этих зонах (рис. 5,а).

Результаты расчета показали значительную неравномерность температуры обмотки. Для обмотки характерны участки с интенсивным отводом теплоты внутри статора и лобовые части, обдуваемые потоком воздуха, возникающим при вращении ротора. Перегрев обмотки наблюдается в зонах ее выхода из статора, но с еще недостаточной интенсивностью движения воздуха. Для этой зоны характерны межвитковые замыкания (рис. 5,б). Вторым фактором, который не исследовался, является возможная вибрация провода как вторичный фактор, способствующий межвитковым замыканиям.

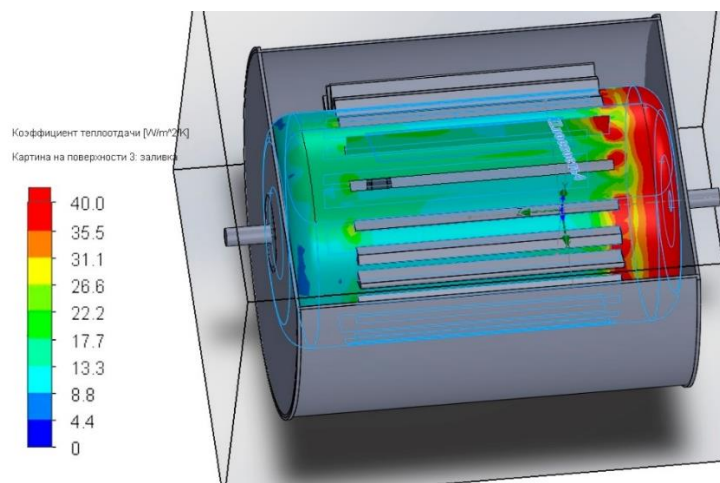


Рис. 3. Распределение коэффициента теплоотдачи по поверхности электродвигателя

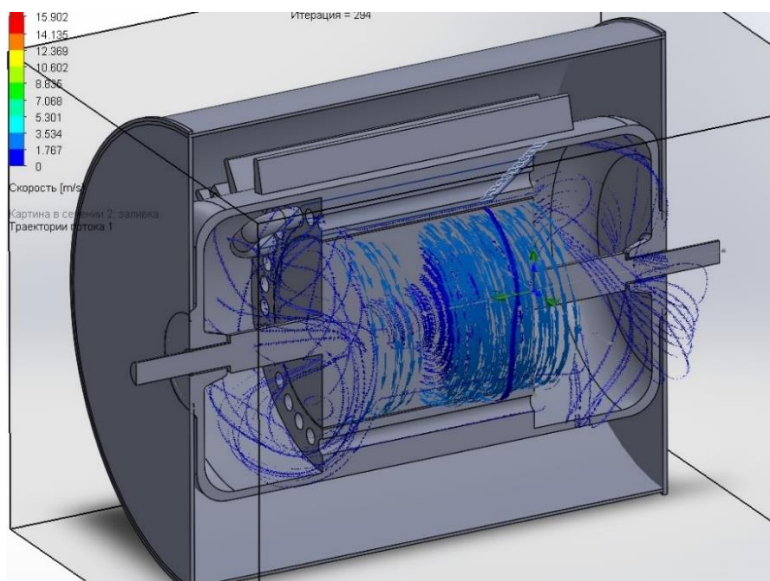


Рис. 4. Поле скоростей движения воздуха внутри корпуса электродвигателя

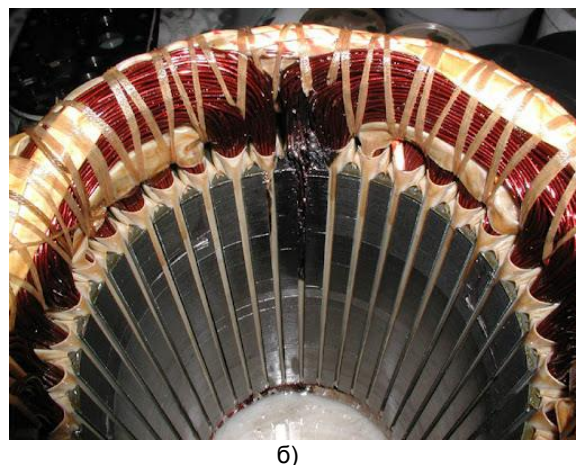
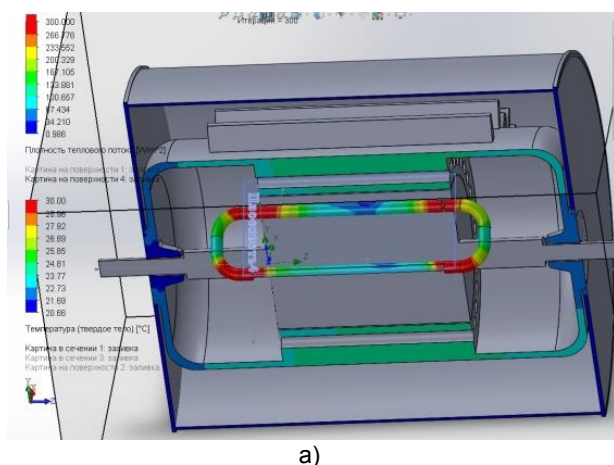


Рис. 5. Локальный перегрев обмотки в районе торца ротора: а – температурное поле; б – зона характерного повреждения обмотки

Определение точного значения количества теплоты, выделяющегося при замыкании пары витков, представляет собой сложную задачу, требующую отдельных исследований, но в качестве ориентировочной выделяемой мощности

на основе анализа пусковых токов для электродвигателя 3 кВт принята мощность 25 Вт. Результат одного из вариантов расчета температурного поля приведен на рис. 6.

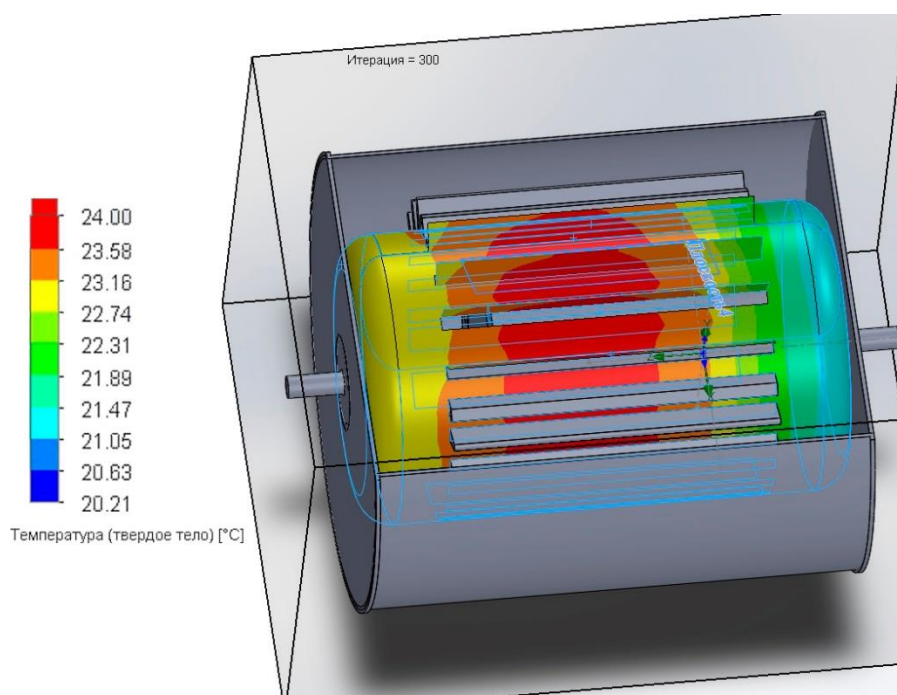


Рис. 6. Поле температур на поверхности корпуса при локальном тепловыделении обмотки 25 Вт и скорости обдува 2 м/с

Анализ полученных значений температур показывает, что повышение температуры относительно фонового ее значения составляет 4 °С, что находится в пределах чувствительности большинства тепловизионных систем и позволяет диагностировать межвитковое замыкание на его начальном этапе развития.

Зависимость отклонения температуры от температуры исправного электродвигателя (принята температура 20 °С) при различных значениях мощности тепловыделения и скорости

охлаждающего корпуса воздуха 5 м/с представлена на рис. 7,а. Зависимость имеет вид, близкий к линейной. При незначительном тепловыделении, характерном для начального этапа развития дефекта, отклонение температуры составляет около 2 °С, что недостаточно для надежного его выявления.

Блокировка вентиляционной решетки повышает отклонение температуры (рис. 7,б) при тепловой мощности 25 Вт до 5 °С, что позволяет рекомендовать этот метод для визуализации дефекта. Влияние скорости обдува на температуру

поверхности корпуса между ребрами представлено на рис. 7, в.

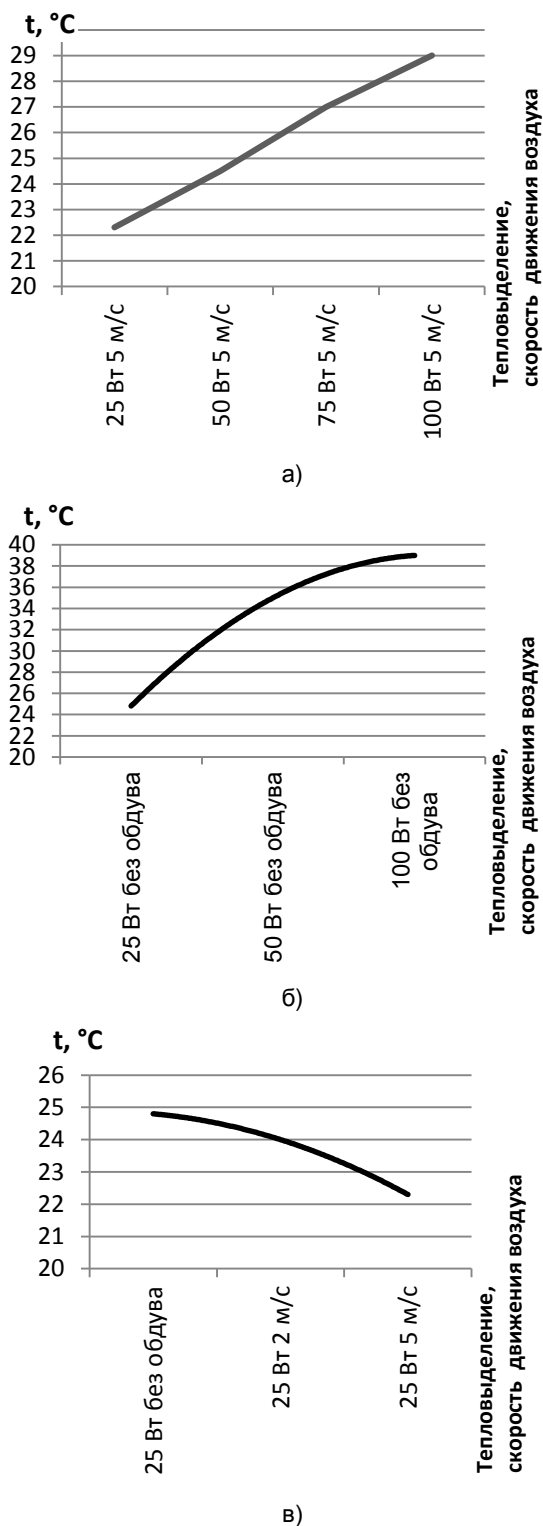


Рис. 7. Зависимости температуры корпуса электродвигателя между ребрами системы охлаждения: а – от мощности тепловыделения при скорости движения воздуха 5 м/с; б – то же без обдува (вентиляционные каналы закрыты); в – от скорости движения воздуха при тепловыделении 25 Вт

Полученные температурные поля позволили выполнить дополнительные исследования

температурных напряжений в статоре электродвигателя при его локальном перегреве, сопровождающем межвитковое короткое замыкание. На рис. 8 представлен результат расчета термического напряжения, который показывает, что возникающие напряжения по величине сопоставимы с пределом текучести металла, а с учетом слоистой структуры статора можно сделать вывод о вероятном расслоении сердечника статора в результате такого воздействия.

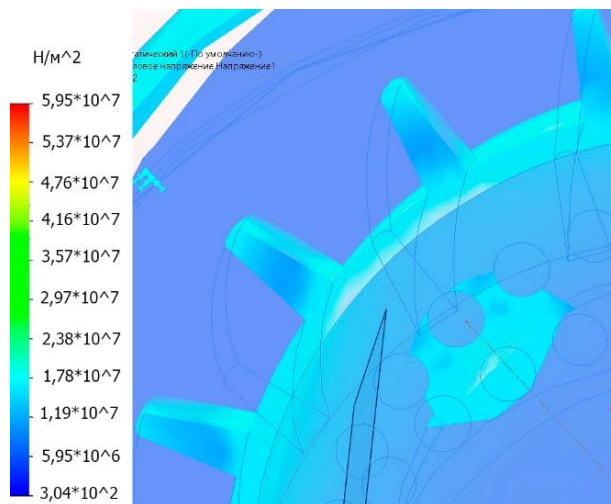


Рис. 8. Статическое напряжение в корпусе статора в результате его локального перегрева

Выводы. Численное моделирование межвиткового короткого замыкания в статоре асинхронного электродвигателя позволяет рекомендовать тепловизионный контроль для выявления подобных дефектов, в том числе на ранних стадиях развития короткого замыкания при относительно небольших тепловыделениях. Для выявления дефекта необходима тепловизионная съемка всей поверхности электродвигателя с выявлением аномальных локальных перегревов, выявляемых по температуре поверхности корпуса между ребрами системы охлаждения. Для локализации дефекта и уточнения результатов обследования может быть рекомендовано кратковременное перекрытие вентиляционных отверстий, в результате которого происходит незначительное повышение температуры электродвигателя, но при этом заметное повышение температуры поверхности в зоне дефекта.

Список литературы

1. **Никиян Н.Г., Митрофанов С.В., Омон А.Б.** Электромагнитные процессы и токи трехфазного асинхронного двигателя при межвитковых коротких замыканиях // *Электричество*. – 2010. – № 5. – С. 53–56. – EDN LJWDTP.
2. **Шестаков И.В.** Совершенствование технологии диагностирования изоляции тяговых электродвигателей подвижного состава: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. – Омск, 2017. – 141 с.

3. **Диб Мухаммад.** Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе анализа тока статора: дис. ... канд. техн. наук: 2.4.2. – М., 2023. – 140 с.
4. **Сафин Н.Р.** Совершенствование методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01. – Екатеринбург, 2017. – 152 с.
5. **Супуева А.С.** Снижение дефектности межвитковой изоляции обмоток низковольтных асинхронных электродвигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.02. – Томск, 2016. – 121 с.
6. **Гоголев Г.А.** Методики и средства диагностики и контроля отдельных показателей качества тяговых трансформаторов и электрических машин подвижного состава: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – СПб., 2000. – 112 с.
7. **Мустафаев Р.И., Ахмедов Д.А., Ахмедов А.Д.** Диагностирование асинхронного двигателя при межвитковом замыкании в обмотке статора // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 1. – С. 48–53. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-1-48-53. – EDN AVMAGZ.
8. **Сурков Д.В., Фильченко Е.А., Назаренко Д.А.** Способы определения межвитковых замыканий в обмотках электрических машин // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: Труды X Всерос. науч.-техн. конф., Оренбург, 01 января – 31 января 2019 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет». – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2019. – С. 304–305. – EDN YWRRGE.
9. **Пехота А.Н., Галушко В.Н., Громыко И.Л.** Диагностирование межвитковых коротких замыканий трансформаторов с помощью комплексного анализа данных приборного учета // Энергоэффективность. – 2021. – № 2. – С. 24–28. – EDN QKETOO.
10. **Лавренов Е.О.** Методы и устройство обеспечения непрерывности производственного цикла при появлении электрической несимметрии в цепях крупных асинхронных двигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01. – Новосибирск, 2021. – 126 с.
11. **Еремеева В.А.** Алгоритмы обработки информации для оценки технического состояния асинхронного электродвигателя исполнительных механизмов АСУ ТП: дис. ... канд. техн. наук: 2.3.1. – Челябинск, 2025. – 105 с.
12. **Королев Н.А.** Оценка технического состояния электротехнических комплексов с асинхронным электроприводом по частотным составляющим спектра тока: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – СПб., 2021. – 169 с.
13. **Гулов Д.Ю.** Разработка электротехнического комплекса диагностики аварийных режимов короткого замыкания генераторов гидроэлектростанций малой и средней мощности: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Челябинск, 2021. – 148 с.
14. **Куприянов И.С., Лукьянов А.В.** Математическое моделирование механических колебаний асинхронного двигателя при межвитковом замыкании обмотки статора // System Analysis and Mathematical Modeling. – 2024. – Т. 6, № 3. – С. 339–356. DOI: 10.17150/2713-1734.2024.6(3).339-356. – EDN ISFBBZ.
15. **Солодкий Е.М., Сальников С.В., Даденков Д.А.** Диагностика межвиткового замыкания обмотки статора асинхронного двигателя на основе анализа траектории вращения вектора тока статора // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 34. – С. 114–127. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.2.07. – EDN MVRTUB.
16. **Галушко В.Н., Пехота А.Н., Громыко И.Л.** Применение интеллектуальных нейросетей для диагностики межвитковых замыканий трансформаторов // Проблемы безопасности на транспорте: материалы X Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 26–27 ноября 2020 года / Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, Белорусская железная дорога, Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта». Ч. 4. – Гомель: Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», 2020. – С. 88–89. – EDN SDDHTN.
17. **Галушко В.Н., Ермоленко Д.В.** Моделирование электромагнитных процессов при возникновении межвитковых замыканий в трехфазном асинхронном двигателе // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. – 2024. – № 1(48). – С. 7–10. – EDN YDWUDF.
18. **Громыко И.Л., Пацкевич В.А.** Моделирование электромагнитных процессов в однофазном трансформаторе при межвитковых замыканиях на основе т-образной схемы замещения // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. – 2024. – № 1(48). – С. 11–16. – EDN DJOEGS.
19. **Громыко И.Л., Галушко В.Н.** Диагностирование межвитковых замыканий в трансформаторе и обучение сверточных нейронных сетей // Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 апреля 2021 года. – Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021. – С. 158–163. – EDN EEEVVL.
20. **Жежеленко И.В., Кривонос В.Е., Василенко С.В.** Критерии выявления межвитковых замыканий в статорных обмотках с использованием векторного анализа фазных токов электродвигателя // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2021. – Т. 64, № 3. – С. 202–218. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-3-202-218. – EDN QRTGOL.
21. **Еремеева В.А.** Диагностика межвитковых замыканий в статоре асинхронного двигателя методом матричных пучков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2025. – № 5. – С. 1–10. DOI: 10.25791/pribor.5.2025.1579. – EDN VIAEGK.
22. **Пустовой Д.О., Петушков М.Ю.** Диагностика межвитковых замыканий асинхронного двигателя // Фундаментальные основы, теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики: материалы XIX Междунар. молодеж. науч.-практ. конф., Новочеркасск, 27–28 февраля 2018 года. – Новочеркасск: ООО «Лик», 2018. – С. 43–50. – EDN YWPWHB.
23. **Овсяник Е.А., Хлопова А.В.** Сравнительный анализ методов выявления межвитковых замыканий силовых трансформаторов 10/0,4 кВ // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Междунар. науч.-техн. конф. студ., асп., ученых. – 2023. – Т. 11, № 1. – С. 43–45. – EDN QWWDP.

24. **Мирош Д.В.** Контроль межвитковых замыканий в обмотке асинхронного электродвигателя // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25–26 апреля 2024 года. – Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2024. – С. 337–338. – EDN LFGADM.

25. **Электротехническая** лаборатория «Протон». – URL: <https://elab72.ru/electroizmereniya/11-teplovizionnyy-kontrol.html> (дата обращения: 11.09.2025).

References

1. Nikiyan, N.G., Mitrofanov, S.V., Omon, A.B. Elektromagnitnye protsessy i toki trekhfaznogo asinkhronnogo dvigatelya pri mezhvitkovykh korotkikh замыкaniyakh [Electromagnetic processes and currents of a three-phase asynchronous motor during interturn short circuits]. *Elektrichestvo*, 2010, no. 5, pp. 53–56. EDN LJWDTP.

2. Shestakov, I.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii diagnostirovaniya izolyatsii tyagovykh elektrodvigately podvizhnogo sostava*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Improving the technology of diagnosing the insulation of traction electric motors of rolling stock. Cand. tech. sci. diss.]. Omsk, 2017. 141 p.

3. Dib, Muhammad. *Diagnostika neispravnostey asinkhronnykh dvigateley na osnove analiza toka statora*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Diagnostics of faults of asynchronous motors based on the analysis of the stator current. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2023. 140 p.

4. Safin, N.R. *Sovershenstvovanie metodiki tokovoy diagnostiki asinkhronnykh dvigateley s korotkozamknutym rotorom*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Improving the methodology of current diagnostics of asynchronous motors with a squirrel-cage rotor. Cand. tech. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2017. 152 p.

5. Supueva, A.S. *Snizhenie defektnosti mezhvitkovoy izolyatsii obmotok nizkovol'tnykh asinkhronnykh elektrodvigately*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Reducing the Defectiveness of Interturn Insulation of Windings of Low-Voltage Asynchronous Electric Motors. Cand. tech. sci. diss.]. Tomsk, 2016. 121 p.

6. Gogolev, G.A. *Metodiki i sredstva diagnostiki i kontrolya otdel'nykh pokazateley kachestva tyagovykh transformatorov i elektricheskikh mashin podvizhnogo sostava*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Methods and means of diagnostics and control of individual quality indicators of traction transformers and electric machines of rolling stock. Cand. tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2000. 112 p.

7. Mustafaev, R.I., Akhmedov, D.A., Akhmedov, A.D. Diagnostirovanie asinkhronnogo dvigatelya pri mezhvitkovom замыкании v obmotke statora [Diagnostics of an asynchronous motor with an interturn short circuit in the stator winding]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2021, vol. 64, no. 1, pp. 48–53. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-1-48-53. EDN AVMAZG.

8. Surkov, D.V., Fil'chenko, E.A., Nazarenko, D.A. Sposoby opredeleniya mezhvitkovykh замыканий v obmotkakh elektricheskikh mashin [Methods for determining interturn short circuits in the windings of electric machines]. *Trudy X Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Energetika: sostoyanie, problemy, perspektivy»*, Orenburg, 01 yanvarya – 31 yanvarya 2019 goda [Proceedings of X all Russian scientific and technical conference “Power engineering: state, problems, prospects”, Orenburg, January 1 – January 31, 2019]. Orenburg:

Orenburgskiy gosudarstvennyy universitet, 2019, pp. 304–305. EDN YWRRGE.

9. Pekhota, A.N., Galushko, V.N., Gromyko, I.L. Diagnostirovanie mezhvitkovykh korotkikh замыканий transformatorov s pomoshch'yu kompleksnogo analiza dannykh pribornogo ucheta [Diagnosing interturn short circuits of transformers using a comprehensive analysis of instrument metering data]. *Energoeffektivnost'*, 2021, no. 2, pp. 24–28. EDN QKETO.

10. Lavrenov, E.O. *Metody i ustroystvo obespecheniya nepreryvnosti proizvodstvennogo tsikla pri poyavlenii elektricheskoy nesimmetrii v tsepyakh krupnykh asinkhronnykh dvigateley*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Methods and device for ensuring continuity of the production cycle when electrical asymmetry appears in the circuits of large asynchronous motors. Cand. tech. sci. diss.]. Novosibirsk, 2021. 126 p.

11. Ereemeeva, V.A. *Algoritmy obrabotki informatsii dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnogo elektrodvigatelya ispolnitel'nykh mekhanizmov ASU TP*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Information processing algorithms for assessing the technical condition of an asynchronous electric motor of actuators of an automated process control system. Cand. tech. sci. diss.]. Chelyabinsk, 2025. 105 p.

12. Korolev, N.A. *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya elektrotekhnicheskikh kompleksov s asinkhronnym elektropivodom po chastotnym sostavlyayushchim spektra toka*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Assessment of the technical condition of electrical complexes with an asynchronous electric drive based on the frequency components of the current spectrum. Cand. tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2021. 169 p.

13. Gulov, D.Yu. *Razrabotka elektrotekhnicheskogo kompleksa diagnostiki avariynykh rezhimov korotkogo замыканий generatorov gidroelektrostantsiy maloy i sredney moshchnosti*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of an electrical engineering complex for diagnosing emergency short-circuit conditions in generators of low- and medium-power hydroelectric power plants. Cand. tech. sci. diss.]. Chelyabinsk, 2021. 148 p.

14. Kupriyanov, I.S., Luk'yanov, A.V. Matematicheskoe modelirovanie mekhanicheskikh kolebaniy asinkhronnogo dvigatelya pri mezhvitkovom замыкании obmotki statora [Mathematical modeling of mechanical vibrations of an asynchronous motor with interturn short circuit of the stator winding]. *System Analysis and Mathematical Modeling*, 2024, vol. 6, no. 3, pp. 339–356. DOI: 10.17150/2713-1734.2024.6(3).339–356. EDN ISFBBZ.

15. Solodkiy, E.M., Sal'nikov, S.V., Dadenkov, D.A. Diagnostika mezhvitkovogo замыканий obmotki statora asinkhronnogo dvigatelya na osnove analiza traektorii vrashcheniya vektora toka statora [Diagnostics of interturn short circuit of the stator winding of an asynchronous motor based on the analysis of the trajectory of rotation of the stator current vector]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*, 2020, no. 34, pp. 114–127. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.2.07. EDN MVRTUB.

16. Galushko, V.N., Pekhota, A.N., Gromyko, I.L. Primenenie intellektual'nykh neyrosetey dlya diagnostiki mezhvitkovykh замыканий transformatorov [Application of intelligent neural networks for diagnostics of interturn short circuits of transformers]. *Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy bezopasnosti na transporte»*, Gomel', 26–27 noyabrya 2020 goda [Proceedings of the X International Scientific and Practical

Conference “Transport Safety Issues”, Gomel, November 26–27, 2020]. Gomel: Belarusian State University of Transport, 2020, pp. 88–89. EDN SDDHTN.

17. Galushko, V.N., Ermolenko, D.V. Modelirovanie elektromagnitnykh protsessov pri vozniknovenii mezhvitkovykh zamykaniy v trekhfaznom asinkhronnom dvigatele [Modeling of electromagnetic processes during the occurrence of interturn short circuits in a three-phase asynchronous motor]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport*, 2024, no. 1(48), pp. 7–10. EDN YDWUDF.

18. Gromyko, I.L., Patskevich, V.A. Modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v odnofaznom transformatore pri mezhvitkovykh zamykaniyakh na osnove t-obraznoy skhemy zameshcheniya [Modeling of electromagnetic processes in a single-phase transformer with interturn short circuits based on a T-shaped equivalent circuit]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport*, 2024, no. 1(48), pp. 11–16. EDN DJOEGS.

19. Gromyko, I.L., Galushko, V.N. Diagnostirovanie mezhvitkovykh zamykaniy v transformatore i obuchenie svertochnykh neyronnykh setey [Diagnosing interturn short circuits in a transformer and training convolutional neural networks]. *Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Avtomatizirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami AES I TES», Minsk, 27–28 aprelya 2021 goda [Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference “Automated process control systems for NPPs and TPPs”, Minsk, April 27–28, 2021]*. Minsk: Belorusskiy gosudarstvennyy universitet informatiki i radioelektroniki, 2021, pp. 158–163. EDN EEEVVL.

20. Zhezhelenko, I.V., Krivonosov, V.E., Vasilenko, S.V. Kriterii vyyavleniya mezhvitkovykh zamykaniy v statornykh obmotkakh s ispol'zovaniem vektornogo analiza faznykh tokov elektrodvigatelya [Criteria for detecting interturn short circuits in stator windings using vector analysis of phase currents of an electric motor]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG*, 2021, vol. 64, no. 3, pp. 202–218. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-3-202-218. EDN QRTGOL.

21. Ereemeva, V.A. Diagnostika mezhvitkovykh zamykaniy v statore asinkhronnogo dvigatelya metodom

matrichnykh puchkov [Diagnostics of interturn short circuits in the stator of an asynchronous motor using the matrix beam method]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2025, no. 5, pp. 1–10. DOI: 10.25791/pribor.5.2025.1579. EDN VIAEGK.

22. Pustovoy, D.O., Petushkov, M.Yu. Diagnostika mezhvitkovykh zamykaniy asinkhronnogo dvigatelya [Diagnostics of interturn short circuits of an asynchronous motor]. *Materialy XIX Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Fundamental'nye osnovy, teoriya, metody i sredstva izmereniy, kontrolya i diagnostiki», Novochoerkassk, 27–28 fevralya 2018 goda [Proceedings of the 19th International Youth Scientific and Practical Conference “Fundamental principles, theory, methods and means of measurements, control and diagnostics”, Novochoerkassk, February 27–28, 2018]*. Novochoerkassk: OOO Lik, 2018, pp. 43–50. EDN YWPWHB.

23. Ovsyanik, E.A., Khlopova, A.V. Sravnitel'nyy analiz metodov vyyavleniya mezhvitkovykh zamykaniy silovykh transformatorov 10/0,4 kV [Comparative analysis of methods for detecting interturn short circuits of 10/0,4 kV power transformers]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov, uchennykh «Energo- i resursosberezhenie v teploenergetike i sotsial'noy sfere» [Proceedings of the International scientific and technical conference of students, graduate students, and scientists “Energy and resource conservation in heat and power engineering and the social sphere”]*, 2023, vol. 11, no. 1, pp. 43–45. EDN QWWDDPP.

24. Mirosh, D.V. Kontrol' mezhvitkovykh zamykaniy v obmotke asinkhronnogo elektrodvigatelya [Monitoring of interturn short circuits in the winding of an asynchronous electric motor]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii», Mogilev, 25–26 aprelya 2024 goda [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Materials, equipment and resource-saving technologies”, Mogilev, April 25–26, 2024]*. Mogilev, 2024, pp. 337–338. EDN LFGADM.

25. *Elektrotekhnicheskaya laboratoriya «Proton» [Electrical engineering laboratory “Proton”]*. Available at: <https://elab72.ru/electroizmereniya/11-teplovizionnyy-kontrol.html> (date of access: 11.09.2025).

УДК 621.311

Александр Николаевич Антонов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: alex.antonov.embox@gmail.com

Владимир Дмитриевич Лебедев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Исследование феррорезонансных явлений в электромагнитных трансформаторах напряжения сетей 6–10 кВ при воздействии дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю

Авторское резюме

Состояние вопроса. Среди явлений, оказывающих негативное влияние на работу оборудования в сетях с изолированной нейтралью, особое место занимают феррорезонансные явления. Данная проблема актуальна не только для сетей РФ, но и для сетей ряда европейских стран. Тем не менее на сегодняшний день однозначно не установлены закономерности и параметры элементов сети (электромагнитных трансформаторов напряжения и суммарных емкостей сети), которые в достаточной степени могли бы установить факт потенциального возникновения феррорезонансных явлений. Кроме того, существует проблема экспериментального подтверждения антирезонансных свойств трансформаторов напряжения заводами-изготовителями в рамках независимых лабораторий. Таким образом, возникает задача исследования феррорезонансных явлений на базе полноразмерной физической модели сети с изолированной нейтралью, позволяющей оценить условия возникновения данного рода процессов, с применением реальных электромагнитных трансформаторов напряжения, выпускаемых современными производителями.

Материалы и методы. Методом исследования, способным наиболее адекватно отразить характер протекания процессов и порядок исследуемых величин в рамках исследуемого вопроса, является физическое моделирование на базе стенда для моделирования сетей 6–10 кВ.

Результаты. Исследованы количественные параметры фазных токов и напряжений первичных обмоток трансформаторов напряжения, а также токов дуги и утроенного напряжения нулевой последовательности с выводов «разомкнутого треугольника» при феррорезонансных явлениях в сети. Получены осциллограммы, иллюстрирующие характер изменения величин указанных токов и напряжений при инициировании феррорезонансных процессов. Дана оценка применения различных методов предотвращения феррорезонансных явлений в сетях с изолированной нейтралью.

Выводы. Полученные результаты позволяют сделать выводы о количественных характеристиках параметров сети, при которых возникают феррорезонансные процессы, а также об эффективности ряда мер по предотвращению феррорезонансных явлений в сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью.

Ключевые слова: феррорезонансные явления, сети с изолированной нейтралью, трансформатор напряжения, дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю, переходные процессы, антирезонансные трансформаторы напряжения

Aleksandr Nikolaevich Antonov

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: alex.antonov.embox@gmail.com

Vladimir Dmitrievich Lebedev

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Study of ferroresonance phenomena in 6–10 kV electromagnetic voltage transformers when exposed to intermittent single-phase earth faults

Abstract

Background. Ferroresonance occupies a special place among the phenomena that negatively affect the operation of equipment in isolated-neutral networks. This problem is relevant not only for the networks of Russia, but also for a number of European countries. However, to date there are no patterns and parameters of the network elements (electromagnetic

voltage transformers (VT) and total network capacitance), that could sufficiently establish the potential occurrence of ferroresonance phenomena. In addition, there is the problem of experimental validation of anti-resonance properties of VT by manufacturers within independent laboratories. Thus, there is a task to study ferroresonance phenomena based on a full-scale physical model of an isolated-neutral network that allows us to evaluate the conditions of this kind of processes, using real electromagnetic VT produced by modern manufacturers.

Materials and methods. The method of the study that can most adequately reflect the nature of the processes and the order of the values to be studied within the scope of the research is physical modelling based on the test-bed for modelling 6–10 kV networks.

Results. The authors have studied quantitative parameters of phase currents and voltages of VT primary winding, as well as arc currents and triple voltage of zero sequence from the terminals of open delta in case of ferroresonance phenomena in the network. Oscillograms have been obtained, that demonstrate the nature of the change of the values of the indicated currents and voltages during the initiation of ferroresonance processes. Evaluation of the application of different methods for ferroresonance prevention in isolated-neutral networks is given.

Conclusions. The obtained results make it possible to draw conclusions about the quantitative characteristics of the network parameters at which ferroresonance processes occur, as well as on the effectiveness of a number of measures to prevent ferroresonance in 6–10 kV isolated-neutral networks.

Key words: ferroresonance phenomena, isolated-neutral networks, voltage transformer, intermittent single-phase earth faults, transient processes, antiresonant voltage transformers

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.051-057

Введение. В Российской Федерации значительную долю от всех энергосетей 6–35 кВ представляют сети, работающие с изолированной нейтралью. По разным подсчетам, их доля составляет от 70 до 80 % от общей протяженности сетей среднего напряжения. Данный факт обуславливает наличие существенного количества трансформаторов напряжения (ТН), применяемых на соответствующих энергообъектах.

Среди явлений, оказывающих негативное влияние на работу оборудования в сетях с изолированной нейтралью, особое место занимают феррорезонансные явления. Данная проблема актуальна не только для сетей РФ, но и для сетей ряда стран Европы, таких как Испания и Польша [1–4]. Также внимание данному вопросу уделяется со стороны СИГРЭ в виде подготовки соответствующего документа [5].

Характерным признаком протекания феррорезонансных явлений в сетях с изолированной нейтралью является продолжительное воздействие перенапряжений и сверхтоков на первичную обмотку трансформаторов напряжения. Это приводит к повреждению ТН и необходимости их последующей замены. Еще одна опасность феррорезонансных явлений состоит в неограниченной длительности их протекания. Вместе с этим на обмотке «разомкнутого треугольника» возникает величина утроенного напряжения нулевой последовательности, достаточная для ложного срабатывания некоторых защит от ОЗЗ.

Для сетей с изолированной нейтралью характерны несколько факторов, приводящих к развитию электромагнитных колебательных процессов, способных повредить трансформаторы напряжения [6–8]:

- перенапряжения при воздействии дугowych перемежающихся замыканий на землю;
- феррорезонансные явления при включении на ненагруженные шины;

- перенапряжения, возникающие при неполнофазных режимах работы.

Общим для указанных типов феррорезонансных процессов является тот факт, что имеет место возникновение напряжения смещения нейтрали. Это, в свою очередь, сопровождается колебательными процессами на различных гармониках и насыщением ферромагнитных сердечников трансформаторов напряжения [9].

Особый интерес вызывает инициирование феррорезонансных явлений в сетях с изолированной нейтралью при возникновении режима дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю. Это становится возможным ввиду нелинейности характеристики намагничивания электромагнитных трансформаторов напряжения, преимущественно использующихся в сетях среднего напряжения. В моменты гашения дуги возникают переходные процессы, связанные с обменом энергией между емкостями фаз сети и нелинейными индуктивными сопротивлениями ТН, что зачастую сопровождается насыщением сердечников. Войдя в режим насыщения, первичные обмотки ТН становятся подвержены термическому воздействию от протекания сверхтоков, что способно либо повредить сам трансформатор, либо привести к срабатыванию установленных на его выводах предохранителей и отключению ТН от сети. Чем чаще происходят последовательные зажигания и погасания дуги, тем большее время трансформатор напряжения будет находиться под воздействием повышенных токов и напряжений.

Тем не менее на сегодняшний день однозначно не установлены закономерности и параметры элементов сети (электромагнитных ТН и суммарных емкостей сети), которые в достаточной степени могли бы установить факт потенциального возникновения феррорезонансных явлений. Кроме того, существует проблема

экспериментального подтверждения антирезонансных свойств ТН заводами-изготовителями в рамках независимых лабораторий.

Таким образом, возникает задача исследования феррорезонансных явлений на базе полноразмерной физической модели сети с изолированной нейтралью, позволяющей оценить условия возникновения данного рода процессов, с применением реальных электромагнитных ТН, выпускаемых современными производителями.

Методы исследования. Методом исследования, способным наиболее адекватно отразить характер протекания процессов и порядок исследуемых величин, является физическое моделирование. Соответствующие эксперименты проводились на базе физического стенда для моделирования сетей 6–10 кВ, организованного на базе научно-образовательного центра «Высоковольтные измерительные преобразователи и трансформаторы» (НОЦ ВИПТ) ИГЭУ.

Для воспроизведения реальных условий работы трансформаторов напряжения 10 кВ был разработан испытательный стенд, показанный на рис. 1.



Рис. 1. Лабораторная испытательная установка

Для подачи высокого напряжения на установку применен силовой двухобмоточный трансформатор типа ТЛС-100/10 УХЛ2 с номинальной мощностью 100 кВА и высшим номинальным напряжением 10 кВ. Данный трансформатор обладает магнитопроводом трехстержневого типа из холоднокатаной электротехнической стали. Питание стенда производится со стороны обмотки 0,4 кВ с помощью лабораторных автотрансформаторов АТСН-80-380. Лабораторный

автотрансформатор АТСН-80-380 с номинальной мощностью 60 кВА предназначен для регулировки однофазного напряжения в пределах от 0 до 430 В при питании от сети напряжением 380 В, частотой 50 Гц.

Для подключения высоковольтной обмотки силового трансформатора к остальной части установки используются высоковольтные выключатели ВВТЕЛ 15 кВ с пофазным управлением. Такие выключатели предназначены для коммутации электрических цепей с изолированной нейтралью при нормальных и аварийных режимах работы в сетях переменного тока частоты 50 Гц с номинальным напряжением до 15 кВ. Наличие возможности пофазного типа управления необходимо для моделирования различного рода неполнофазных режимов, часто приводящих к феррорезонансным явлениям.

В качестве емкостей фаз на землю применен набор высоковольтных конденсаторов КБГ-П 30 кВ с номинальными емкостями 0,1 и 1 мкФ. Указанные емкости сгруппированы в виде наборной панели. Наличие специальной наборной панели позволяет комбинировать указанные конденсаторы для получения более точного соответствия модели и сети. Для подключения в нейтраль силового трансформатора используются высоковольтные конденсаторы с емкостью 0,5 мкФ. Междофазные емкости не моделировались, так как их наличие приводит к ограничению уровней перенапряжений.

В рамках исследования эксперименты проводятся на группе однофазных трансформаторов напряжения ЗНОЛ-НТЗ-10 УХЛ2 с номинальным первичным напряжением $10/\sqrt{3}$ кВ. Корпус трансформаторов выполнен из эпоксидного компаунда, который одновременно является главной изоляцией и обеспечивает защиту обмоток от механических и климатических воздействий. Данные трансформаторы работают в системе с изолированной нейтралью без автоматического отключения при замыкании на землю, поэтому должны выдерживать в течение 8 часов приложенное напряжение, равное $1,9 \cdot U_{ном}$. Трансформаторы обеспечивают питание приборов учета электроэнергии, контрольно-измерительной аппаратуры, релейных (микропроцессорных) защит, автоматики и используются, когда требуются измерения фазных напряжений и контроль изоляции сети 6 или 10 кВ.

Измерительная часть испытательного стенда представлена датчиками напряжения, тока и устройством обработки полученных сигналов.

Для моделирования дугового замыкания используется несколько типов замыкателей, в числе которых имеются разрядник с поворотным контактом и разрядник с контактом на воздушной подвеске.

В рамках данного исследования феррорезонансные процессы в сети были получены с помощью опыта моделирования дуговых

однофазных замыканий на землю. Схема испытательной установки для данного опыта представлена на рис. 2.

Для создания режима с возникновением дуговых перемежающихся замыканий на землю использовался разрядник с поворотным контактом. В нормальном режиме в высоковольтной части линейное напряжение поддерживалось на уровне 12 кВ (максимальное рабочее напряжение для ТН класса напряжения 10 кВ по ГОСТ 29322–2014 (IEC 60038:2009)). Количество повторных зажигания дуги – 20, длительность паузы после каждого погасания дуги – не менее 5 с.

Также в нескольких экспериментах между нейтральной точкой первичных обмоток ТН и землей были включены резисторы с суммарным сопротивлением 733 Ом для оценки влияния данного фактора на вероятность погашения феррорезонансных явлений. Дополнительно было исследовано действие прибора для погашения феррорезонансных явлений СЗТн У2.1, подключаемого к выводам вторичных обмоток, соединенных в «разомкнутый треугольник».

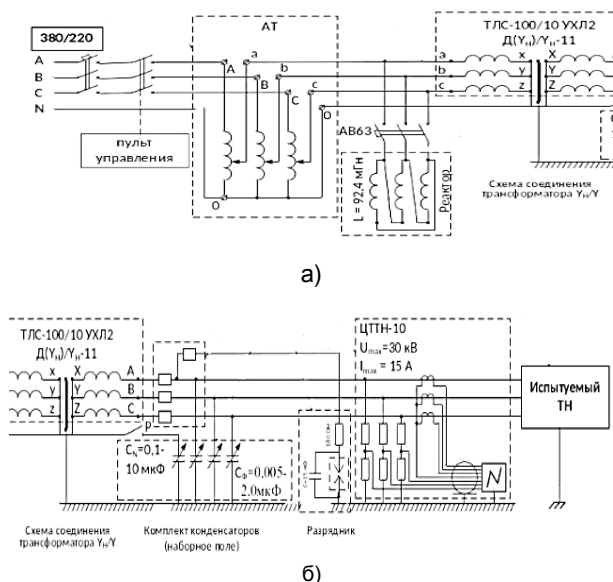


Рис. 2. Схема установки для испытания на устойчивость ТН к воздействиям при перемежающемся дуговом однофазном замыкании на землю с подключением предварительно заряженной емкости в нейтраль силового трансформатора: а – участок схемы 0,4 кВ; б – участок схемы 10 кВ

Результаты исследования. Результатами исследования являются статистические данные в виде осциллограмм фазных токов и напряжений первичных обмоток ТН, а также токов дуги и напряжений $3U_0$ с выводов «разомкнутого треугольника» для суммарной емкости сети в диапазоне от 96,76 до 10052,6 нФ.

Одной из выявленных особенностей является ограниченный диапазон значений суммарной емкости сети, при которых возникали феррорезонансные явления. В частности, для исследуемых ТН 3хЗНОЛ-НТЗ-10 УХЛ2 он составляет 199,16–2078,4 нФ. Пример осциллограмм при

зарегистрированном протекании устойчивого феррорезонансного явления после погасания дуги для суммарной емкости сети 976 нФ приведен на рис. 3, 4.

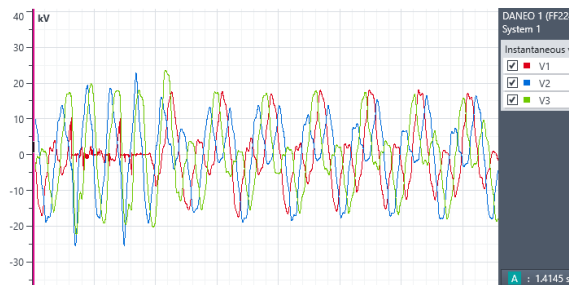


Рис. 3. Осциллограммы фазных напряжений при перемежающейся дуге (вращающийся замыкатель) в моделируемой сети суммарной емкостью 976 нФ

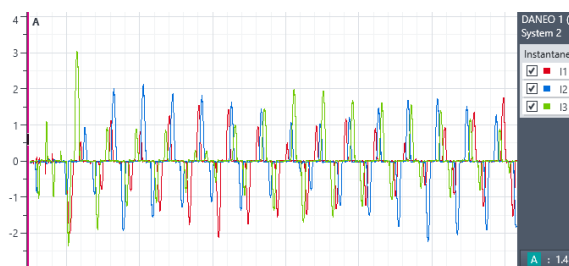


Рис. 4. Осциллограммы фазных токов при перемежающейся дуге (вращающийся замыкатель) в моделируемой сети с суммарной емкостью 976 нФ

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод об отсутствии корреляции между увеличением значения суммарной емкости сети и повышением вероятности возникновения феррорезонансных явлений.

Также было исследовано влияние включения между нейтральной точкой первичных обмоток ТН и землей активного сопротивления (733 Ом). Наличие резисторов не оказывало влияния на вероятность возникновения феррорезонансных явлений. Единственным положительным следствием такого включения является ограничение действующих значений фазных токов в первичных обмотках ТН (рис. 5, 6).

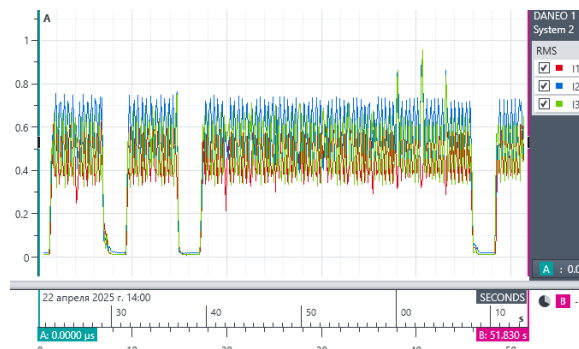


Рис. 5. Действующие значения фазных токов при перемежающейся дуге (вращающийся замыкатель) в моделируемой сети с суммарной емкостью 976 нФ при отсутствии резисторов в нейтрали первичных обмоток ТН

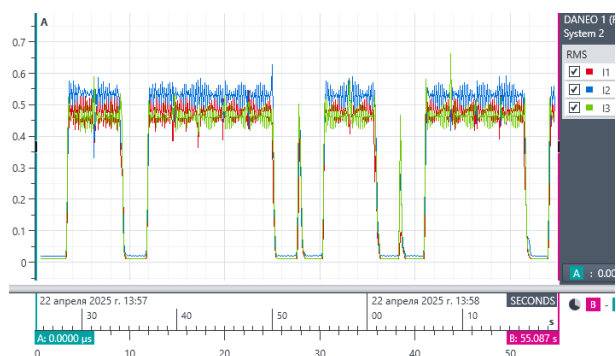


Рис. 6. Действующие значения фазных токов при перемежающейся дуге (вращающийся замыкатель) в моделируемой сети с суммарной емкостью 976 нФ при наличии резисторов в нейтрали первичных обмоток ТН

При этом в экспериментах с величиной суммарной емкости сети от 4,2 мкФ наблюдается выход из строя установленных резисторов, что приводит к разземлению нейтрали первичных обмоток ТН.

Таким образом, включение активного сопротивления величиной 733 Ом и менее между нейтральной точкой первичных обмоток ТН и землей не является мерой, способной предотвратить или даже снизить вероятность возникновения феррорезонансных явлений, а также может привести к недопустимому режиму заземления первичных обмоток ТН (а именно, обрыву нейтрали ТН).

В рамках данного исследования также было проанализировано действие прибора для погашения феррорезонансных явлений СЗТн У2.1, подключаемого к выводам вторичных обмоток, соединенных в «разомкнутый треугольник». Производитель гарантирует эффективную работу устройства при дуговых перемежающихся замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью. При проведении экспериментов диапазон значений суммарных емкостей сети, вызывающих феррорезонанс, сократился до 976–2078,4 нФ. Заявленное ранее увеличение линейного напряжения в ходе испытаний с номинального значения 10 кВ до максимального рабочего (12 кВ) привело к отказу устройства на указанном диапазоне суммарных емкостей сети после нескольких успешных срабатываний. Данный факт иллюстрируется осциллограммами на рис. 7, 8.

К аналогичному выводу относительно вопроса эффективности приборов, демпфирующих феррорезонансные явления при подключении к обмотке «разомкнутого треугольника», пришли польские коллеги из Горно-металлургической академии им. Станислава Сташица в Кракове [10]. В рамках своего исследования они анализировали работу приборов ABB VT Guard и Orion EE Ferro-Damp, которые аналогично рассмотренному ранее СЗТн У2.1 должны погашать феррорезонансные явления в сетях с изолированной нейтралью и с электромагнитными ТН.

Тем не менее авторы [10] подчеркивают ограниченную эффективность указанных устройств, подтверждая выдвинутые положения соответствующими осциллограммами. Таким образом, на сегодняшний момент существующие приборы для погашения феррорезонансных явлений, включаемые в обмотку «разомкнутого треугольника», не способны в полной мере выполнять закладываемую в них производителями функцию и требуют дальнейшего усовершенствования.

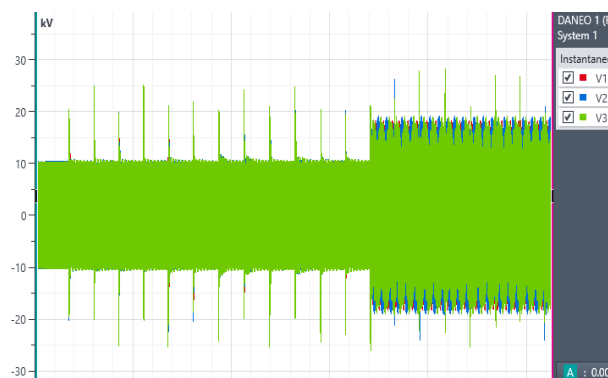


Рис. 7. Осциллограммы фазных напряжений при перемежающейся дуге (вращающийся замыкатель) в моделируемой сети с суммарной емкостью 976 нФ при подключении прибора СЗТн У2.1

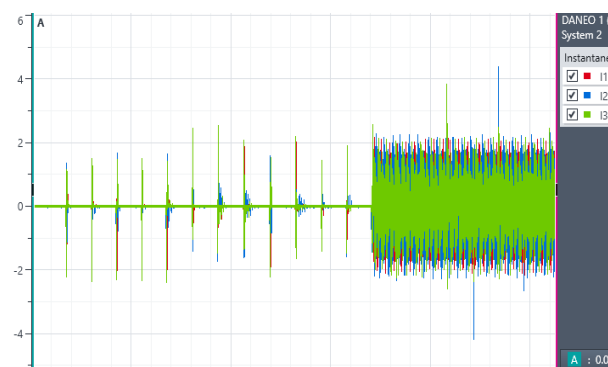


Рис. 8. Осциллограммы фазных токов в первичных обмотках ТН при перемежающейся дуге (вращающийся замыкатель) в моделируемой сети с суммарной емкостью 976 нФ при подключении прибора СЗТн У2.1

Организационно-технические мероприятия по предотвращению повреждаемости трансформаторов напряжения в сетях с изолированной нейтралью. Для эффективного проведения мероприятий по предотвращению повреждений воспользуемся разграничениями явлений в сетях с трансформаторами напряжений, передоложенными Ю.Л. Саенко и А.С. Поповым [11, 12], которые предлагают разделить повреждаемость трансформаторов при перемежающихся замыканиях на повреждаемость при феррорезонансе, который определяется равенством эквивалентного индуктивного сопротивления ТН и емкостного сопротивления сети

$\omega L_{\text{экв}} = 1/\omega C$, и повреждаемость ТН в результате «перевозбуждения». Термин «перевозбуждение» авторы применяют для режимов, когда имеет место повышение напряжения на обмотках высшего напряжения (ВН), например во время однофазных дуговых замыканий (ОДЗ) через перемежающуюся дугу, удовлетворяющих условиям, вызывающим эскалацию напряжения (например, в соответствии с теорией Петерсена). Пример такого повышения напряжения представлен на рис. 9. В данном режиме могут недопустимо возрастать токи в обмотках ВН, выводя ТН из строя. Причем следует отметить, что условие равенства $\omega L_{\text{экв}} = 1/\omega C$ может не соблюдаться, поэтому повышение токов без соблюдения указанного равенства не относится, строго говоря, к феррорезонансу.

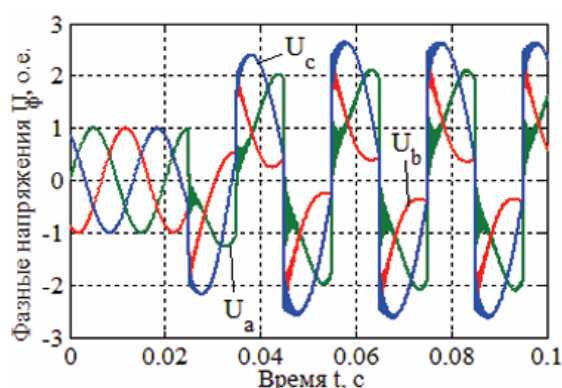


Рис. 9. Расчетные кривые фазных напряжений в обмотке ТН при перемежающемся ОДЗ

Разделение физических явлений позволяет разграничить меры по предотвращению повреждений. Многочисленные эксперименты, выполненные в данном исследовании, показывают, что область существования феррорезонанса в диапазоне емкостей сети существенно ниже, чем это зафиксировано в редакции стандарта по испытанию на предмет феррорезонанса, и ограничивается диапазоном $0,2 \div 1$ мкФ (в стандарте диапазон емкостей ограничен 10,7 мкФ для ТН 10 кВ и 27 мкФ для ТН 6 кВ), что в какой-то мере коррелирует с данными [12], где диапазон емкостей резонанса ограничен 1,5 мкФ, что может быть связано как с параметрами самого трансформатора напряжения, так и с условиями проведения экспериментов (в нашем случае испытания проводились на максимальном рабочем напряжении $1,2 U_{\text{ном}}$).

На основании проведенных исследований и данных [11, 12] можно рекомендовать включение резистора 25 Ом и менее в цепь «разомкнутого треугольника» вторичной обмотки для предотвращения феррорезонансных явлений, однако для ТН с литой изоляцией выделение тепловой энергии при ОЗЗ в первичной обмотке и обмотке цепи «замкнутого треугольника» может превышать предельные значения, по сравнению с трансформаторами с масляной

изоляцией, осуществляющей более эффективное охлаждение. Таким образом, включение резистора сопротивлением 25 Ом и менее может быть недопустимо.

В режиме перевозбуждения, вызванного явлением эскалации напряжения на обмотке ВН, не сопровождаемого резонансом, работа резистора в обмотке «разомкнутого треугольника» малозффективна. В этом режиме следует применять меры для ограничения тока в обмотке ВН, единственный способ это сделать – добавить сопротивление в нейтраль обмотки трансформатора. В общем смысле под термином сопротивление можно подразумевать как активное сопротивление, так и нелинейную индуктивность в виде однофазного трансформатора, включенного в нейтраль ТН, реализованного в выпускаемых трансформаторах типа НАМИ. Следует отметить, что нелинейная индуктивность при несимметричной дуге с присутствием в спектре постоянной составляющей подвержена насыщению и феррорезонанс в этом режиме возможен по причине снижения сопротивления.

Для резистивного сопротивления рекомендованный диапазон сопротивлений в нейтрали трансформатора – 5–10 кОм [12], меньшие сопротивления, как показали исследования, неэффективны. Также при выборе активного сопротивления следует обратить внимание на его стойкость к тепловому удару. При проведении экспериментов используемые резисторы регулярно перегорали, разземляя обмотки ВН. Результаты экспериментов позволяют сделать следующие выводы: применение мощных резисторов типа RX24, выпускаемых в алюминиевом корпусе, выполняющем роль радиатора, не рекомендуется; наиболее предпочтительны проволочные резисторы типа С5-35В(ПЭВ); величина сопротивления в нейтрали должна выбираться с учетом точности измерений в соответствии с рекомендациями изготовителя. Более точный выбор резистора должен быть проведен на основе анализа емкости сети и вероятности ОЗЗ с эскалацией напряжения на обмотках ВН.

Список литературы

1. **Ferroresonant** Configurations in Power Systems / V. Valverde, G. Buigues, A.J. Mazón, et al. // *Renew. Energy Power Qual. J.* – 2012. – Vol. 10, No. 4. – P. 474–479.
2. **Araujo A.E.A., Soudack A.C., Marti J.R.** Ferroresonance in power systems: chaotic behaviour // *IEEE Proceedings-c.* – May 1993. – Vol. 140. – P. 237–240.
3. **Ferroresonance** in voltage transformers: Analysis and simulations / V. Valverde, A.J. Mazón, I. Zamora, G. Buigues // *Renew. Energy Power Qual. J.* – 2007. – Vol. 1, No. 5. – P. 465–471.
4. **Mitigating** Ferroresonance in Voltage Transformers in Ungrounded MV Networks / W. Piasecki, M. Florkowski, M. Fulczyk, et al. // *IEEE Transactions on Power Delivery.* – October 2007. – Vol. 22, No. 4. – P. 2362–2369.

5. CIGRE WG C4.307 Technical Brochure 569 - Resonance and Ferroresonance in Power Net-works. – February 2014.

6. **Зихерман М.Х.** Трансформаторы напряжения для сетей 6–10 кВ. Причины повреждаемости // Новости электротехники. – 2003. – № 1(25).

7. **Борисенко Л.С., Панасюк Д.И., Стреляев П.И.** Предотвращение повреждений трансформаторов напряжения контроля изоляции 35 кВ при замыканиях на землю // Энергетик. – 1983. – № 9. – С. 21–23.

8. **Дударев Л.Е., Волошек И.В., Левковский А.И.** Численный анализ феррорезонансных процессов в сетях с изолированной нейтралью // Электрические станции. – 1991. – № 1. – С. 66–71.

9. **Петров О.А.** Смещение нейтрали при пофазных отключениях и обрывах фаз в компенсированной сети // Электрические станции. – 1972. – № 9. – С. 57–61.

10. Analysis of Ferroresonance Mitigation Effectiveness in Auxiliary Power Systems of High-Voltage Substations / R. Tarko, W. Nowak, J. Gajdzica, S. Czapp // Energies. – 2024. – Vol. 17, No. 10. – P. 2423.

11. **Саенко Ю.Л., Попов А.С.** Определение границ существования феррорезонанса в сети с изолированной нейтралью и электромагнитными трансформаторами напряжения типа НТМИ-6-66 на основе компьютерного моделирования // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – № 12(82). – С. 9–16.

12. **Саенко Ю.Л., Попов А.С.** Исследование причин повреждения трансформаторов напряжения контроля изоляции // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – № 7(89). – С. 59–66.

References

1. Valverde, V., Buigues, G., Mazón, A.J., Zamora, I., Albizu, I. Ferroresonant Configurations in Power Systems. *Renew. Energy Power Qual. J.*, 2012, vol. 10, no. 4, pp. 474–479.

2. Araujo, A.E.A., Soudack, A.C., Marti, J.R. Ferroresonance in power systems: chaotic behaviour. IEE Proceedings-c, May 1993, vol. 140, pp. 237–240.

3. Valverde, V., Mazón, A.J., Zamora, I., Buigues, G. Ferroresonance in voltage transformers: Analysis and simulations. *Renew. Energy Power Qual. J.*, 2007, vol. 1, no. 5, pp. 465–471.

4. Piasecki, W., Florkowski, M., Fulczyk, M., Mahonen, P., Nowak, W. Mitigating Ferroresonance in Voltage Transformers in Ungrounded MV Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, October 2007, vol. 22, no. 4, pp. 2362–2369.

5. CIGRE WG C4.307 Technical Brochure 569 – Resonance and Ferroresonance in Power Networks. February 2014.

6. Zikherman, M.Kh. Transformatory napryazheniya dlya setey 6–10 kV. Prichiny povrezhdaemosti [Voltage transformers for 6–10 kV networks. The causes of damageability]. *Novosti elektrotekhniki*, 2003, no. 1(25).

7. Borisenko, L.S., Panasyuk, D.I., Strelyaev, P.I. Predotvrashchenie povrezhdeniy transformatorov napryazheniya kontrolya izolyatsii 35 kV pri zamykaniyakh na zemlyu [Prevention of damage to 35 kV insulation control voltage transformers in case of earth faults]. *Energetik*, 1983, no. 9, pp. 21–23.

8. Dudarev, L.E., Voloshek, I.V., Levkovskiy, A.I. Chislenny analiz ferrozonansnykh protsessov v setyakh s izolirovannoy neytral'yu [Numerical analysis of ferroresonance processes in isolated-neutral networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1991, no. 1, pp. 66–71.

9. Petrov, O.A. Smeshchenie neytrali pri pofaznykh otklyucheniyyakh i obryvakh faz v kompensirovannoy seti [Neutral displacement during phase disconnections and phase failures in compensated networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1972, no. 9, pp. 57–61.

10. Tarko, R., Nowak, W., Gajdzica, J., Czapp, S. Analysis of Ferroresonance Mitigation Effectiveness in Auxiliary Power Systems of High-Voltage Substations. *Energies*, 2024, vol. 17, no. 10, p. 2423.

11. Saenko, Yu.L., Popov, A.S. Opredelenie granits sushchestvovaniya ferrozonansa v seti s izolirovannoy neytral'yu i elektromagnitnymi transformatorami napryazheniya tipa NTMI-6-66 na osnove komp'yuternogo modelirovaniya [Determination of the boundaries of existence of ferroresonance in isolated-neutral network and the electromagnetic voltage transformers NTMI-6-66 on the basis on the computer simulation]. *Energoberezhnie. Energetika. Energoaudit*, 2010, no. 12(82), pp. 9–16.

12. Saenko, Yu.L., Popov, A.S. Issledovanie prichin povrezhdeniya transformatorov napryazheniya kontrolya izolyatsii [Study of the causes of damage to isolation monitoring voltage transformers]. *Energoberezhnie. Energetika. Energoaudit*, 2011, no. 7(89), pp. 59–66.

УДК 004.021

Сергей Николаевич Литвинов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново, e-mail: litvinov.sn@ispu.ru

Численное моделирование датчиков частичных разрядов на основе метода конечных элементов для задач диагностики изоляции

Авторское резюме

Состояние вопроса. Для диагностики частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования используются различные типы датчиков, в том числе и индуктивные. Традиционные подходы не позволяют полноценно анализировать переходные процессы, возникающие в электрической цепи, содержащей индуктивный датчик, поскольку они не учитывают его характеристик. Для получения сколько-нибудь достоверных результатов требуется градуировка измерительного канала, что не всегда возможно в условиях реальной эксплуатации. В то же время точное моделирование индуктивного датчика, учитывающее все физические процессы, возникающие в нем при проекции импульсного тока частичного разряда, позволит не только получить его характеристики, но и рассчитать кажущийся заряд – ключевой параметр для оценки состояния изоляции. Таким образом, разработка модели, позволяющей исключить необходимость градуировки измерительного канала и напрямую связать зарегистрированный сигнал с физическими параметрами разряда, является актуальной задачей.

Материалы и методы. Разработка гибридной имитационной модели основана на сочетании численного решения уравнений Максвелла методом конечных элементов с анализом эквивалентной электрической цепи и учете магнитного поля, токов смещения через межвитковые емкости и взаимодействия с внешней цепью. Для анализа импульсного сигнала использовано дискретное преобразование Фурье и метод наложения гармоник. Расчет кажущегося заряда выполнен интегрированием тока за четверть периода.

Результаты. Разработана гибридная имитационная модель, позволяющая рассчитывать индуктивность датчика с погрешностью 3,1 % относительно аналитического решения, определять резонансную частоту и добротность, восстанавливать форму импульсного сигнала частичных разрядов по первой и третьей гармоникам с погрешностью 1,84 %, вычислять величину кажущегося заряда.

Выводы. Предложенная модель позволяет проектировать и анализировать индуктивные датчики частичных разрядов, исключать градуировку измерительного канала и получать характеристики разряда расчетным методом, напрямую связывая зарегистрированный сигнал с физическими параметрами разряда. Модель универсальна, ее можно применять как для традиционных измерительных преобразователей, так и для систем на базе датчиков без ферромагнитного сердечника. Результаты подтверждены сравнением с аналитическими расчетами и могут быть использованы для автоматизированной диагностики изоляции.

Ключевые слова: индуктивный датчик частичных разрядов, математическое моделирование, метод конечных элементов, гибридная модель, кажущийся заряд, дискретное преобразование Фурье, амплитудно-частотная характеристика, диагностика изоляции

Sergey Nikolaevich Litvinov

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Power Plants, Substations and Electrical Equipment Diagnostics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: litvinov.sn@ispu.ru

Numerical simulation of partial discharge sensors based on the finite element method for insulation diagnostics

Abstract

Background. Various types of sensors, including inductive ones, are used for partial discharge diagnostics in the insulation of high-voltage equipment. Conventional approaches do not allow a comprehensive analysis of transient processes occurring in an electrical circuit with an inductive partial discharge sensor, as they fail to account for the sensor actual characteristics. Therefore, to obtain any reliable results, calibration of the measurement channel is required, which is not always feasible under real operating conditions. At the same time, accurate modeling of an inductive sensor that considers all physical phenomena occurring during the passage of a partial discharge impulse current, enables not only to determine its characteristics but also to calculate the apparent charge, which is the key parameter to assess insulation condition. Thus, it is relevant to develop a model that eliminates the need for calibration of the measuring channel and directly links the measured signal with the physical parameters of the discharge.

Materials and methods. A hybrid simulation model has been developed based on combination of the numerical solution of Maxwell's equations using the finite element method with the analysis of an equivalent electrical circuit. The model

accounts for the magnetic field, displacement currents through inter-turn capacitances, and interaction with the external circuit. Discrete Fourier transform and harmonic superposition method are employed for impulse signal analysis. The apparent charge is calculated by integrating the current over a quarter of the period.

Results. The author has developed the hybrid simulation model that allows us to calculate the sensor inductance with an error of 3,1 % compared to the analytical solution, determine the resonant frequency and quality factor (Q-factor), reconstruct the partial discharge impulse waveform using the first and third harmonics with an error of 1,84 %, and calculate the apparent charge value.

Conclusions. The proposed model allows for the design and analysis of inductive partial discharge sensors without requiring measurement channel calibration, directly correlating the registered signal with the physical parameters of the discharge. The model is universal and can be applied both for conventional measuring transducers and systems based on sensors without a ferromagnetic core. The results have been validated through comparison with analytical calculations and can be used for automated insulation diagnostics.

Key words: inductive partial discharge sensor, mathematical modeling, finite element method, hybrid model, apparent charge, discrete Fourier transform, amplitude-frequency characteristic, insulation diagnostics

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.058-068

Введение. Частичные разряды (ЧР) – это микроскопические электрические пробои в изоляции высоковольтного оборудования, такого как трансформаторы, кабели или генераторы [1]. Хотя они не вызывают немедленного отказа, но со временем разрушают изоляцию и могут привести к аварии. В связи с этим диагностика ЧР, особенно для измерительных преобразователей, – важная задача для обеспечения надежности энергосистем [2].

Одним из распространенных способов регистрации ЧР является использование индуктивных датчиков. Они представляют собой катушку, подключаемую последовательно заземляющему проводнику, или магнитопровод с обмоткой, располагаемый на проводнике, и регистрируют импульсы тока, вызванные разрядами [3, 4]. Однако явления, возникающие в таких датчиках, имеют сложную физическую природу: их отклик зависит от геометрии, числа витков, паразитных емкостей между витками и резонансных явлений. Из-за этого простые методы расчета частичных разрядов не дают точных результатов, а экспериментальные установки, предназначенные для регистрации и измерения характеристик частичных разрядов, требуют градуировки измерительного канала² [5, 6]. Градуировка заключается в подаче калибровочного импульса известной величины и построении зависимости между параметрами сигнала (обычно амплитуды импульса напряжения на датчике) и величиной кажущегося заряда. Но на практике, особенно при мониторинге технического состояния оборудования, это сделать сложно или невозможно. Кроме того, не учитываются реальные энергетические преобразования в цепи, содержащей дефект.

Ниже предложена гибридная математическая модель, которая точно описывает работу датчика и позволяет напрямую рассчитать кажущийся заряд по зарегистрированному сигналу частичного разряда, исключая необходимость

градуировки измерительной цепи. Это повышает точность диагностики и упрощает эксплуатацию систем мониторинга, а также позволяет определять характеристики средств измерения в результате численного расчета.

Методы исследования. Предложено использовать гибридную модель датчика, которая учитывает теорию электромагнитного поля и электрических цепей при анализе процессов, происходящих в датчике во время регистрации сигнала. Схема замещения, отражающая основные свойства моделируемого датчика, представлена на рис. 1. Следует отметить, что в схеме в первом приближении не представлены влияния внешних элементов оборудования исходя из того, что выбранное расположение датчика выполнено так, чтобы существенно минимизировать влияние на него внешних электромагнитных связей.

Для создания модели использован метод декомпозиции – задача разбита на три части.

Первая часть – моделирование магнитного поля. С помощью программы COMSOL Multiphysics методом конечных элементов решено уравнение Максвелла, описывающее распределение магнитного поля в датчике частичных разрядов при протекании по нему тока разряда. На основании предварительного анализа геометрии индуктивного датчика и структуры электромагнитного поля следует вывод о необходимости оптимизации задачи моделирования и поиске решения уравнений на двухмерной осесимметричной расчетной области, позволяющей повысить точность и скорость расчетов. Ввиду того что поле затухает со скоростью, пропорциональной внутреннему радиусу катушки в третьей степени [7], граница расчетной области выбирается с учетом минимального влияния на точность расчетов. Кривизна внешней границы выбрана таким образом, чтобы линии поля скользили по границе расчетной области [7]. Расчетная область полевой модели показана на рис. 2.

² ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000). Методы испытаний высоким напряжением, Измерения частичных разрядов.

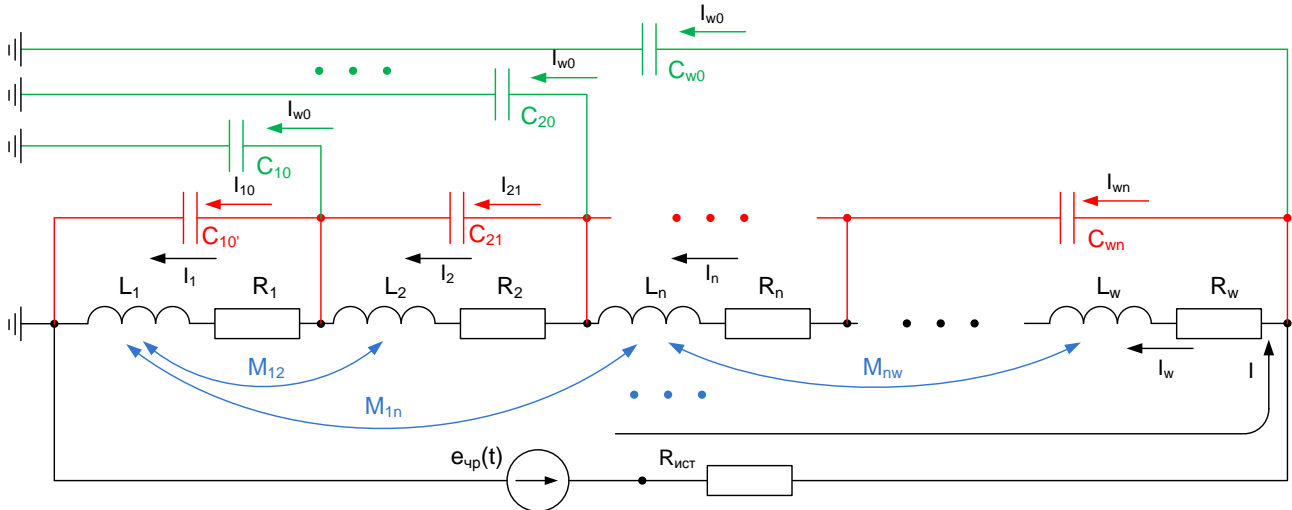


Рис. 1. Схема замещения индуктивного датчика частичных разрядов с учетом наличия емкостных связей и взаимной индукции: R_w – активное сопротивление витка; L_w – собственная индуктивность витка; M_{nw} – взаимная индуктивность между витками; I_w – ток, проходящий по виткам соленоида; I_{wn} – емкостный ток между витками; I_{w0} – емкостный ток между витками и землей; $e_{чр}(t)$ – электродвижущая сила (ЭДС) эквивалента источника ЧР; $R_{ист}$ – эквивалент сопротивления источника ЧР

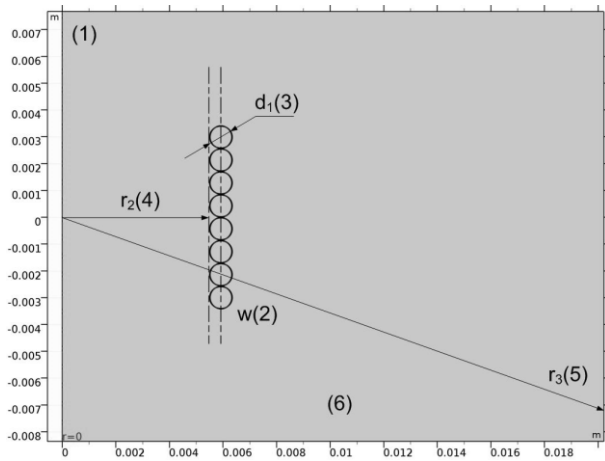


Рис. 2. Расчетная область для исследования характеристик индуктивного датчика ЧР: 1 – ось симметрии; 2 – витки индуктивного датчика; 3 – диаметр сечения витка; 4 – внутренний радиус индуктивного датчика; 5 – радиус внешней границы расчетной области; 6 – среда, в которой находится датчик

Варьируемыми параметрами математической модели являются: количество витков индуктивного датчика w ; диаметр медного проводника с учетом толщины полиэфирного лака d_1 ; внутренний радиус датчика r_2 ; радиус внешней границы расчетной области r_3 . Данные параметры могут варьироваться в целях получения требуемых характеристик датчика.

Для исследования влияния степени дискретизации конечноэлементной сетки на результаты расчетов были проведены эксперименты с компьютерной моделью. В результате исследований выбран уровень оптимальной дискретизации конечноэлементной сетки, число элементов которой составило 14660 шт. для расчетной области с радиусом границы $r_3 = 10$ см (рис. 3).

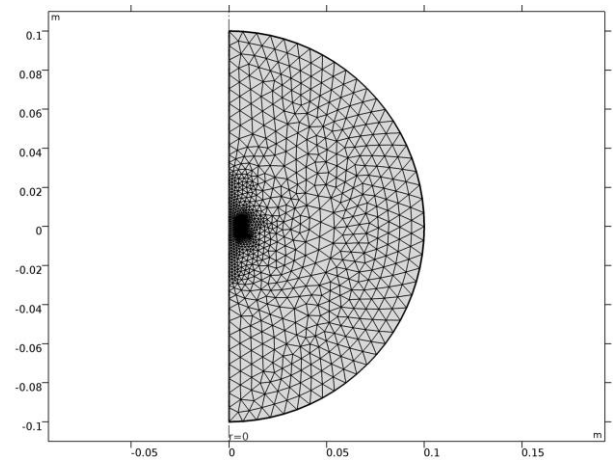


Рис. 3. Конечноэлементная сетка для расчетной области определения параметров электромагнитного поля индуктивного датчика ЧР

Учтено, что частотный спектр сигналов ЧР лежит в широком диапазоне частот [8], но размеры датчика малы по сравнению с длиной волны, поэтому для расчета электрического и магнитного полей можно использовать упрощенное (квазистационарное) приближение. Поставленную задачу удобно решать относительно векторного магнитного потенциала \vec{A} , поэтому запишем теорему о циркуляции вектора магнитной индукции, учитывая параметры среды и выражение для векторного магнитного потенциала $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$:

$$\nabla \times (\mu^{-1} \mu_0^{-1} \cdot \nabla \times \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_{ст}, \quad (1)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость среды; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м; \vec{A} – векторный магнитный потенциал, Вб/м; σ – удельная электропроводность среды,

См/м; $\vec{J}_{\text{ст}}$ – вектор плотности стороннего (созданного частичным разрядом) тока в индуктивном датчике, А/м².

Для рассматриваемой осесимметричной задачи входящий в уравнение (1) вектор \vec{A} имеет лишь одну отличную от нуля азимутальную компоненту при поиске решения в цилиндрических координатах, т.е.

$$\dot{A} = \dot{A}_\varphi \vec{e}_\varphi, \quad (2)$$

где \vec{e}_φ – единичный вектор в азимутальном направлении.

При переходе от временной зависимости к комплексным амплитудам уравнение (1) примет следующий вид:

$$\nabla \times (\mu^{-1} \mu_0^{-1} \cdot \nabla \times \dot{A}) + j\omega\sigma \dot{A} = \frac{\sigma \dot{U}_{\text{витка}}}{2\pi r_1}, \quad (3)$$

где $\dot{U}_{\text{витка}}$ – напряжение на витке обмотки датчика ЧР, В; r_1 – радиус провода обмотки датчика ЧР, м; $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, рад/с; f – частота, Гц; $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Для решения уравнения (3) используются следующие граничные условия:

1) граничные условия Неймана:

– осевая симметрия при $r = 0$;

– непрерывность нормальной составляющей вектора индукции магнитного поля $\vec{n}(\vec{B}_1 - \vec{B}_2) = 0$ для всех внутренних границ разделов сред;

2) граничное условие Дирихле

– магнитная изоляция $\vec{n} \times \vec{A} = \dot{A}_\varphi = 0$ для

внешней границы расчетной области.

Вторая часть задачи – цепное моделирование. При внешнем возмущающем воздействии (частичном разряде) в цепи индуктивного

датчика протекает ток. В схеме замещения внешнее возмущающее воздействие представлено сторонней эквивалентной ЭДС $e_{\text{чр}}(t)$. Внутреннее сопротивление источника представлено активным сопротивлением $R_{\text{ист}}$. Переменный ток, протекающий по виткам индуктивного датчика, порождает переменное магнитное поле, которое наводит ЭДС индукции в витках $e_{\text{витка}}(t)$ и складывается из ЭДС самоиндукции $e_L(t)$ витка и ЭДС взаимной индукции $e_M(t)$ между витками. Уравнение по второму закону Кирхгофа для комплексных амплитуд в описанной схеме замещения будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\text{чр}} = & iR_{\text{ист}} + iR_1 + \dot{E}_{B1} + iR_2 + \dot{E}_{B2} + \\ & + iR_3 + \dot{E}_{B3} + iR_4 + \dot{E}_{B4} + iR_5 + \dot{E}_{B5} + \\ & + iR_6 + \dot{E}_{B6} + iR_7 + \dot{E}_{B7} + iR_8 + \dot{E}_{B8}. \end{aligned} \quad (4)$$

Сумма значений ЭДС витка \dot{E}_B и падения напряжения на активном сопротивлении витка формируют напряжение витка $\dot{U}_{\text{витка}}$:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\text{чр}} = & iR_{\text{ист}} + \dot{U}_{\text{витка1}} + \dot{U}_{\text{витка2}} + \dot{U}_{\text{витка3}} + \\ & + \dot{U}_{\text{витка4}} + \dot{U}_{\text{витка5}} + \dot{U}_{\text{витка6}} + \dot{U}_{\text{витка7}} + \dot{U}_{\text{витка8}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнение (5) устанавливает взаимосвязь магнитного и электрического полей, при которой электрический ток, протекающий в витках индуктивного датчика, равен суперпозиции токов от действия сторонней ЭДС и наведенных токов. В качестве искомой величины выступает напряжение на витках индуктивного датчика, по которому осуществляется взаимосвязь полевой и цепной моделей (рис. 4).

Третья часть задачи – моделирование электрического поля и расчет токов смещения. Ток смещения обусловлен емкостными связями между витками датчика (рис. 5).

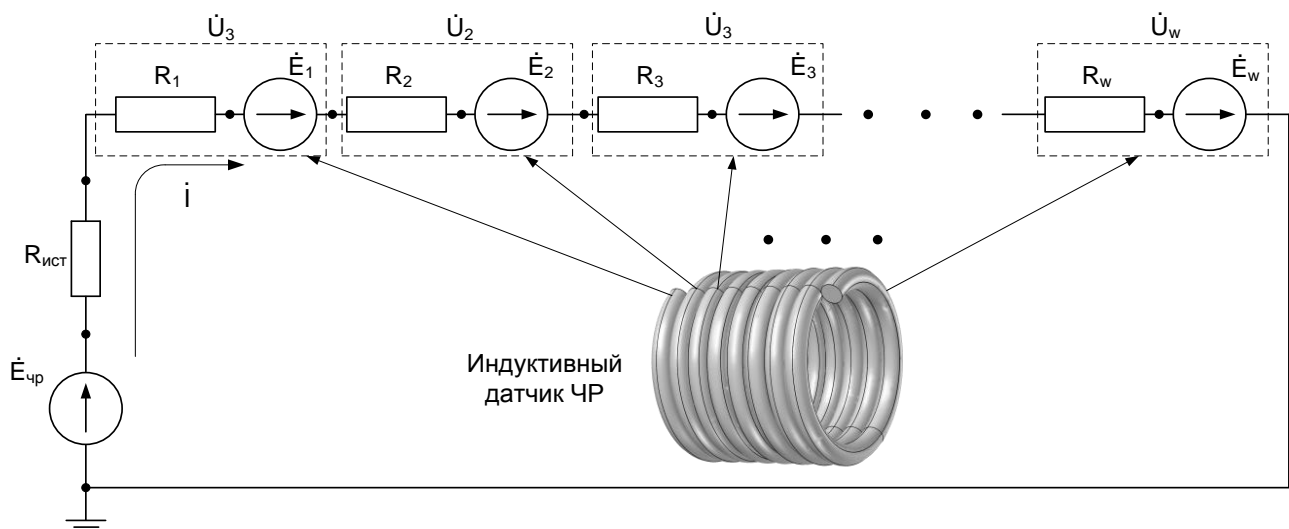


Рис. 4. Схема, отражающая взаимосвязь напряжений на витках индуктивного датчика в полевой и цепной моделях

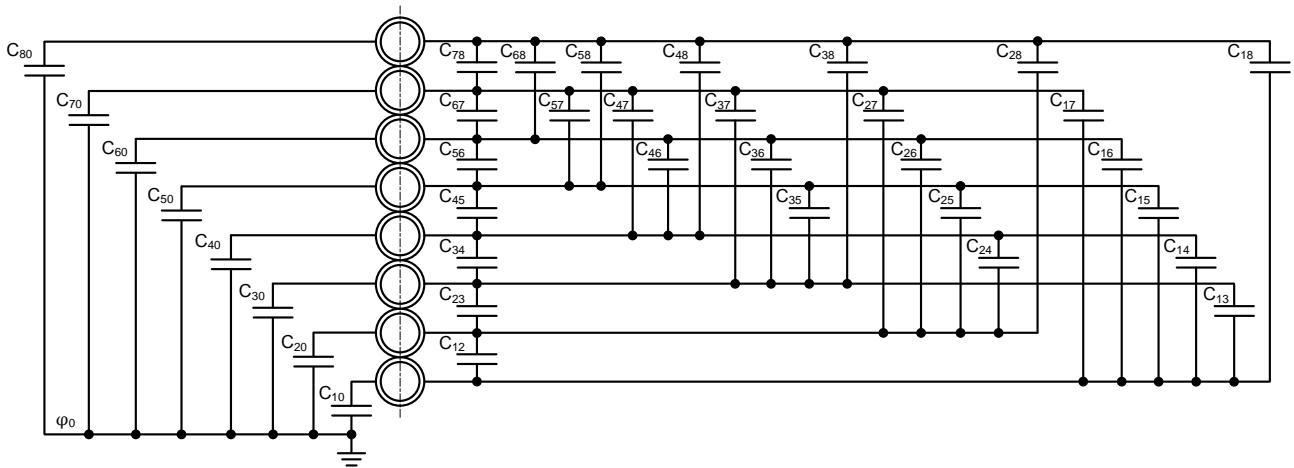


Рис. 5. Схема, отражающая емкостные связи в системе виток-виток и виток-земля индуктивного датчика

С учетом наличия частичных емкостей между витками и потенциального характера электрического поля задача поиска токов через емкости между витками сводится к поиску плотности тока в соответствии с законом Ома в дифференциальной форме:

$$\vec{J}_{\text{емк}} = \sigma \vec{E} + \vec{J}_{\text{ст}}. \quad (6)$$

где $\vec{J}_{\text{емк}}$ – вектор плотности тока смещения через емкостные связи между витками индуктивного датчика, А/м².

Пренебрегая малым значением перпендикулярной компоненты электрического поля $\sigma \vec{E} \ll \vec{J}_{\text{ст}}$, исключаем ее из расчетной области. Принимая допущение о том, что весь сторонний ток протекает по поверхности проводников индуктивного датчика, поставим ему в соответствие ток смещения между витками. Переходя к комплексным амплитудам и учитывая взаимосвязь потенциала и напряженности электрического поля, конечное уравнение (6), определяющее ток смещения, примет вид

$$\vec{J} = j\omega \varepsilon \varepsilon_0 (-\nabla \varphi), \quad (7)$$

где φ – скалярный потенциал электрического поля, В; ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м.

Для решения уравнения (7) используются следующие граничные условия:

1) граничные условия Неймана:

– осевая симметрия при $r = 0$;

– скачок вектора электрического смещения на границе раздела сред на величину, соответствующую поверхностному заряду

$$\vec{n} (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \sigma;$$

2) граничное условие Дирихле:

– электрическая изоляция $\vec{n} \cdot \vec{J} = 0$ для внешней границы расчетной области;

– электрический потенциал $\varphi = \varphi_{i \text{ витка}}$, $i = 1, 2, 3 \dots n$ для внешних границ медного провода индуктивного датчика, где n – число витков.

Результаты исследования. Представленная имитационная модель совмещает цепную модель включения датчика во внешнюю цепь и модель его квазистационарного электромагнитного поля. Полученная модель является гибридной, она позволяет исследовать характеристики датчика, в том числе, и в переходных режимах. Структурная схема гибридной имитационной модели датчика частичных разрядов показана на рис. 6.

Для отображения результатов расчета модели датчика, а также определения некоторых его характеристик были заданы произвольные начальные условия: пусть в цепи установки датчика, включающего 8 витков (диаметр проводника 12,71 мм, длина обмотки 8,7 мм), действует сторонний источник гармонического синусоидального сигнала ЭДС (источник частичных разрядов). Тогда с учетом перехода к форме записи в комплексных амплитудах выражение для ЭДС примет вид

$$\vec{E} = E_{\text{max}} \cdot e^{j\varphi_0}, \quad (8)$$

где E_{max} – амплитудное значение сторонней ЭДС, В; φ_0 – начальная фаза изменения сторонней ЭДС, град.

Результаты расчета магнитного поля, создаваемого током стороннего источника ЭДС, протекающего через индуктивный датчик ЧР при $E_{\text{max}} = 1$ В, частоте $f = 50$ Гц, $\varphi_0 = 0$ град. и $R_{\text{ист}} = 1$ МОм, показаны на рис. 7, где отображены силовые линии магнитного поля, направление вектора индукции магнитного поля и распределение плотности магнитного потока в расчетной области.

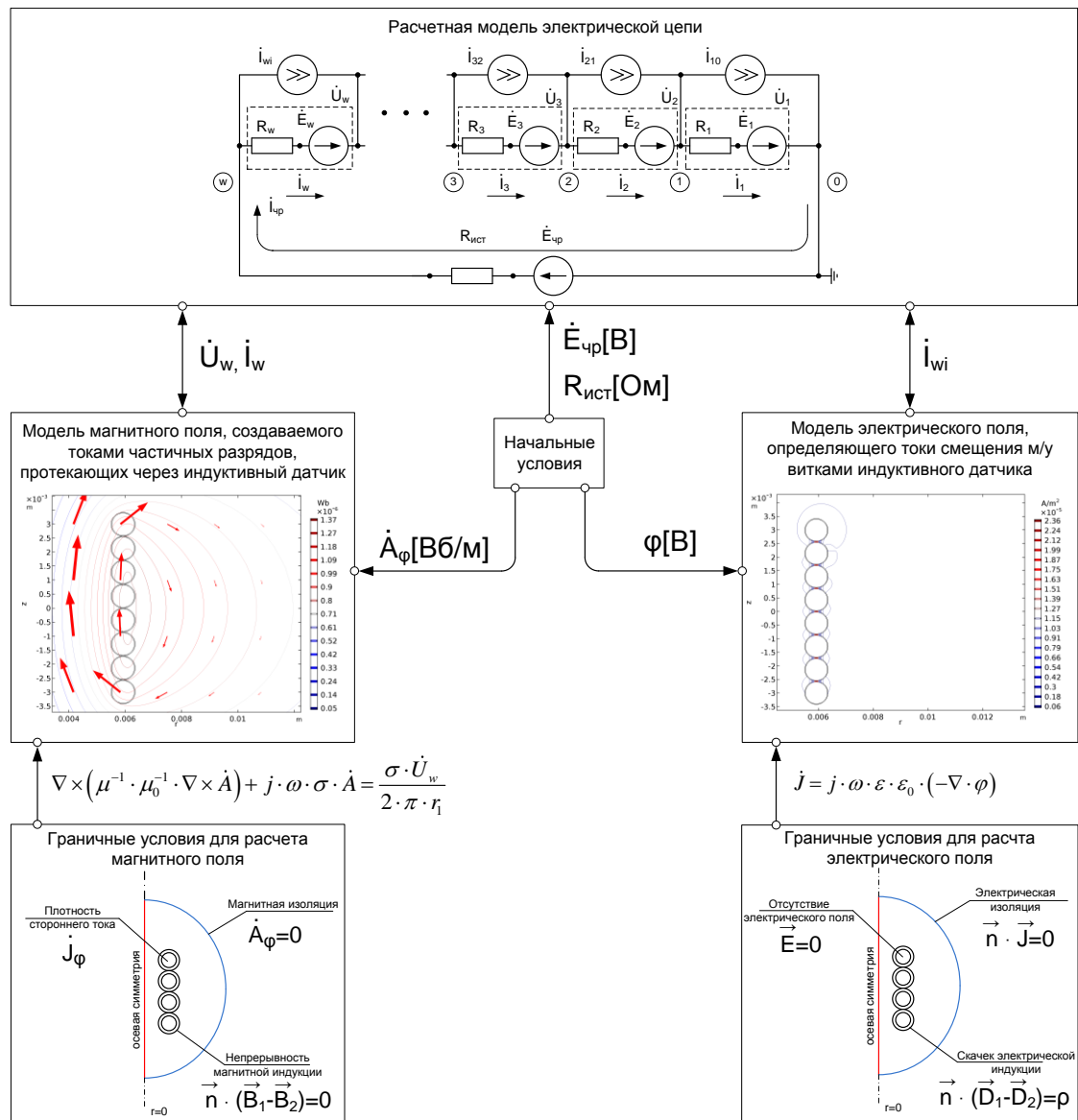


Рис. 6. Структурная схема имитационной гибридной цепной и полевой моделей индуктивного датчика частичных разрядов

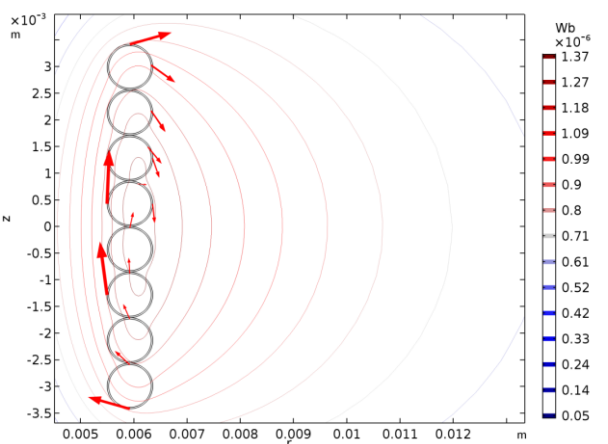


Рис. 7. Линии векторного магнитного потенциала и направление вектора магнитной индукции

Значения тока, протекающего в индуктивном датчике, и значения падений напряжений на его витках представлены в табл. 1

Результаты расчета электрического поля, а именно распределения электрического потенциала и плотности тока смещения в расчетной области при частоте изменения ЭДС источника ЧР 50 Гц, показаны на рис. 8 и 9 соответственно.

Таблица 1. Значения тока, протекающего через индуктивный датчик и значения падений напряжений на его витках

Ток через индуктивный датчик, А	91,95-1,81i
Напряжение на 1-м витке, В	0,11-1,56E-4i
Напряжение на 2-м витке, В	0,11+1,97E-4i
Напряжение на 3-м витке, В	0,11+3,88E-4i
Напряжение на 4-м витке, В	0,11+4,75E-4i
Напряжение на 5-м витке, В	0,11+4,75E-4i
Напряжение на 6-м витке, В	0,11+3,88E-4i
Напряжение на 7-м витке, В	0,11+1,97E-4i
Напряжение на 8-м витке, В	0,11-1,56E-4i
Суммарное падение напряжения на индуктивном датчике, В	0,91+0,0018i

Проинтегрировав плотность тока по контуру сечения витков, получим значения полных токов, втекающих в виток или вытекающих из него (табл. 2).

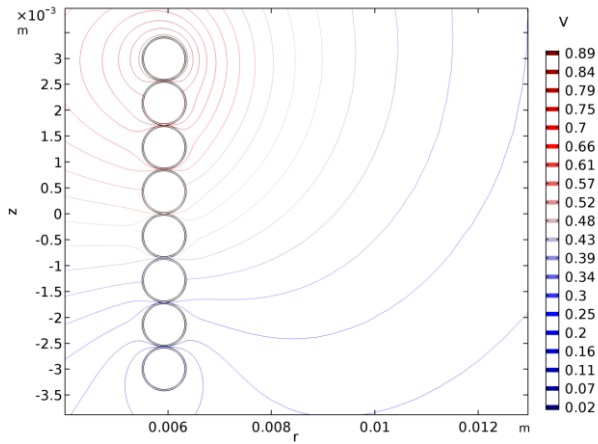


Рис. 8. Распределение электрического потенциала в расчетной области

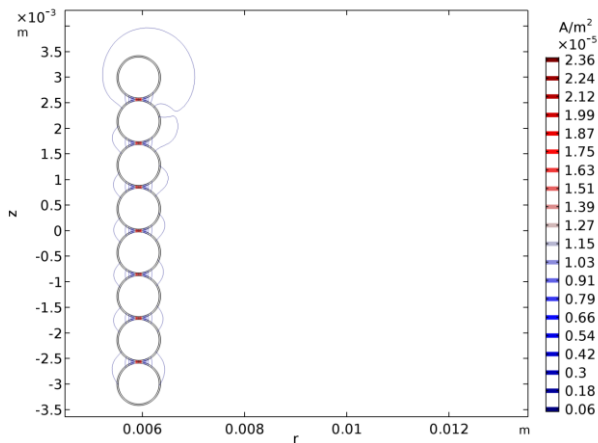


Рис. 9. Плотность тока смещения через частичные емкости между витками индуктивного датчика

Таблица 2. Значения токов, протекающих между витками индуктивного датчика

Номер витка и тока (порядок от верхнего витка к нижнему в соответствии с рис. 9)	Значение тока, А
Ток 8-го витка	$-2,49\text{E}-8+3.88\text{E}-6i$
Ток 7-го витка	$2,3\text{E}-8+6.24\text{E}-7i$
Ток 6-го витка	$1,44\text{E}-8+4.02\text{E}-7i$
Ток 5-го витка	$6,86\text{E}-9+2.31\text{E}-7i$
Ток 4-го витка	$9,25\text{E}-11+7.58\text{E}-8i$
Ток 3-го витка	$-6,67\text{E}-9-8.07\text{E}-8i$
Ток 2-го витка	$-1,39\text{E}-8-2.63\text{E}-7i$

Анализ значений токов смещения (табл. 2) показывает, что их величина незначительна (как показало моделирование, даже при высокой частоте изменения ЭДС источника ЧР). Таким образом, можно пренебречь емкостными составляющими между витками и землей, а также между витками, расположенными друг от друга на расстоянии больше одного витка.

С учетом действия токов смещения между витками индуктивного датчика распределение векторного магнитного потенциала в расчетной области приобретает вид, показанный на рис. 10.

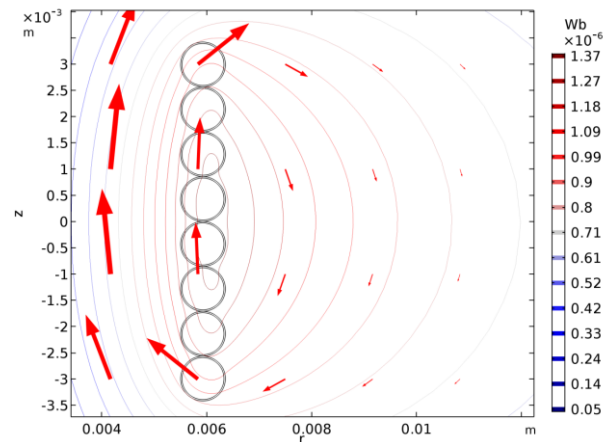


Рис. 10. Линии векторного магнитного потенциала и направление вектора магнитной индукции при частоте 50 Гц с учетом действия токов смещения

Для построения частотных зависимостей датчика в функциях тока (рис. 11) и модуля комплексного сопротивления (рис. 12) производится расчет квазистационарного электромагнитного поля в логарифмическом диапазоне изменения частот от 0 Гц до 1 ГГц и с числом значений частоты на декаду, равным 100.

Для определения резонансной частоты и соответствующей добротности (или сопротивления) схемы модель позволяет рассчитать численно индуктивность датчика частичных разрядов и емкость между его витками.

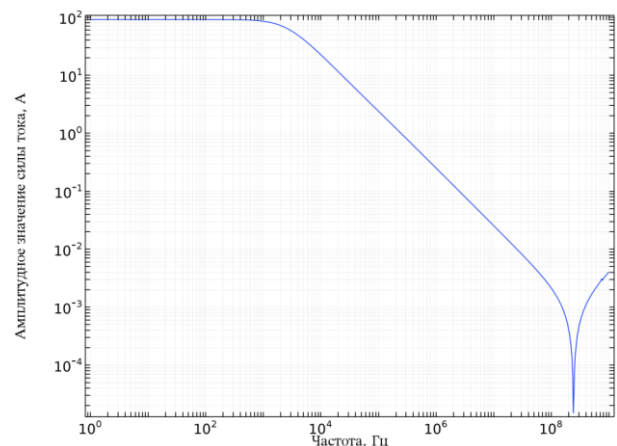


Рис. 11. Частотная зависимость силы тока индуктивного датчика ЧР

Для определения емкости между витками решается задача электростатики с определением третьей группы формул Максвелла для двух витков индуктивного датчика:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \varphi_1 C_{11} + U_{12} C_{12}, \\ \sigma_2 = \varphi_2 C_{22} + U_{21} C_{21}, \end{cases} \quad (9)$$

где σ_1 – поверхностная плотность заряда первого витка, Кл/м; σ_2 – поверхностная плотность заряда второго витка, Кл/м; φ_1 – потенциал первого витка, В; φ_2 – потенциал второго витка, В; C_{11} – собственная емкость первого витка на землю, Ф; C_{22} – собственная емкость второго витка на землю, Ф; $C_{12} = C_{21}$ – взаимные емкости между первым и вторым витками, Ф; $U_{12} = U_{21}$ – разность потенциалов между первым и вторым витками, В.

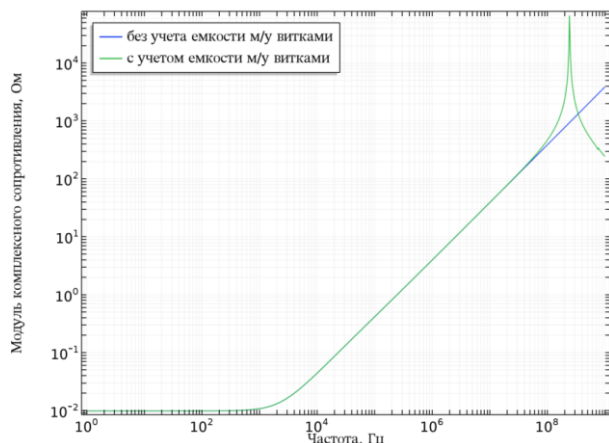


Рис. 12. Частотная зависимость модуля комплексного сопротивления индуктивного датчика ЧР

Решая систему уравнений Максвелла, определим взаимные частичные емкости (рис. 13).

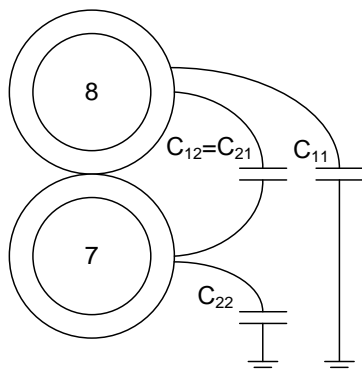


Рис. 13. Собственные и взаимная емкости витков индуктивного датчика

Для поиска взаимных емкостей используется теорема Гаусса, в соответствии с которой определяется величина поверхностного заряда:

$$\nabla \varepsilon_0 (-\nabla \varphi) = \rho. \quad (10)$$

Задавая потенциалы на витках в соответствии с рассчитанными ранее значениями, получим следующее значение взаимной емкости:

$$C_{12} = C_{21} = 5,5 \cdot 10^{-12} \text{ Ф.}$$

Для определения индуктивности датчика частичных разрядов используется выражение для его комплексного сопротивления:

$$L = \frac{\text{Im}(\bar{Z})}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad (11)$$

где \bar{Z} – комплексное сопротивление индуктивного датчика, Ом:

$$\bar{Z} = \frac{\bar{U}}{\bar{I}},$$

где \bar{U} – напряжение на индуктивном датчике, В; \bar{I} – ток, протекающий через индуктивный датчик, А.

Индуктивность также может быть рассчитана по аналитическому выражению [9]

$$L = \frac{\pi}{4} \mu_0 N^2 \frac{d_{\text{внеш}}}{a} K_\alpha, \quad (12)$$

где N – число витков датчика, шт; $d_{\text{внеш}}$ – внешний диаметр датчика, м; a – длина обмотки датчика, м; K_α – коэффициент формы, значение которого зависит от $\alpha = a / d_{\text{внеш}}$ [9].

В табл. 3 показаны значения индуктивности, рассчитанные численным методом и по аналитическому выражению, при частоте ЭДС источника 50 Гц.

Таблица 3. Сравнение результатов расчетов индуктивности датчика ЧР

Расчетное условие	Индуктивность датчика частичных разрядов, Гн
Численный метод	$L_1 = 6,8153 \cdot 10^{-7}$ Гн
Аналитическое выражение	$L_2 = \frac{\pi}{4} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8^2 \cdot \frac{12,71 \cdot 10^{-3}}{8,7 \cdot 10^{-3}} \times 0,599781 = 7,03 \cdot 10^{-7}$ Гн

Относительная погрешность расчетов численным методом по сравнению с аналитическим выражением составляет

$$\delta_1 = \frac{L_2 - L_1}{L_2} \cdot 100 \% = \frac{7,03 \cdot 10^{-7} - 6,81 \cdot 10^{-7}}{7,03 \cdot 10^{-7}} \cdot 100 \% = 3,1 \%. \quad (13)$$

Расчетное значение резонансной частоты составит

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{C}{8}}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{6,8153 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{5,5 \cdot 10^{-12}}{8}}} = 232 \text{ МГц.} \quad (14)$$

Расчетное значение добротности схемы составит

$$Q = \frac{2\pi f_0 L}{R} = \frac{2\pi \cdot 232 \cdot 10^6 \cdot 6,8153 \cdot 10^{-7}}{8 \cdot 0,0098712} = 12585,14. \quad (15)$$

Для расчета характеристик частичных разрядов (в частности, кажущегося заряда) с учетом параметров датчика без использования градуировочных коэффициентов воспользуемся зарегистрированным на датчике сигналом напряжения. Для использования его в качестве источника напряжения в модели проведем эквивалентные энергетические преобразования (симметризацию импульса): заменим участок кривой регистрируемого напряжения с момента достижения им максимума зеркально отраженным убывающим участком и дополним полученный полупериод до целого периода полувольтной обратной полярности (рис. 14)

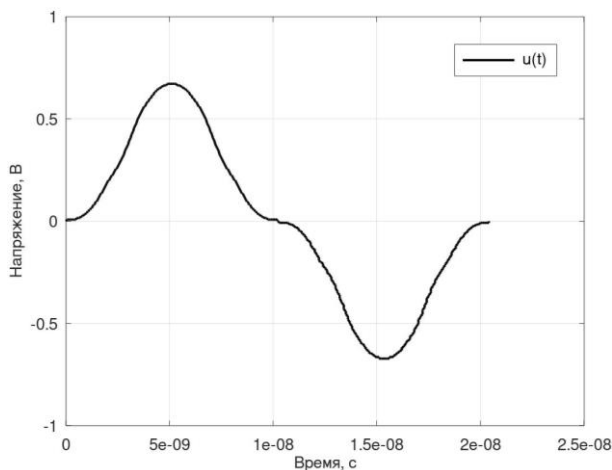


Рис. 14. Период регистрируемого напряжения с учетом преобразований

Для расчета величины кажущегося заряда выполним дискретное Фурье-преобразование периода напряжения. Гистограммы амплитудного и фазового спектров, полученных в ходе Фурье-преобразования, показаны на рис. 15 и 16 соответственно.

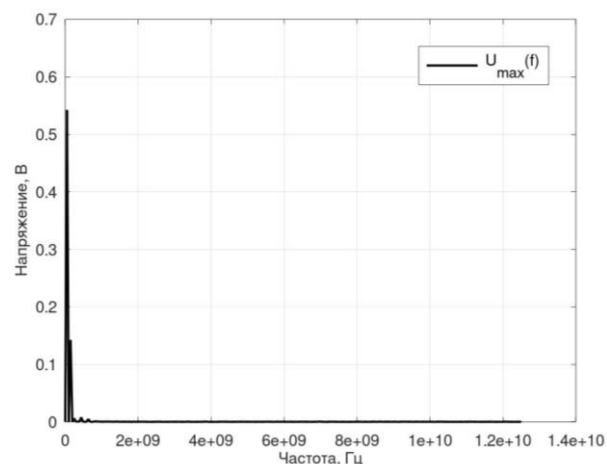


Рис. 15. Амплитудный спектр преобразованного сигнала напряжения

При анализе спектра регистрируемого напряжения выявлено, что значимыми являются первая и третья гармоники (табл. 4), остальные –

при дальнейших расчетах не учитываются. При этом относительная погрешность расчетов составляет 1,84 %.

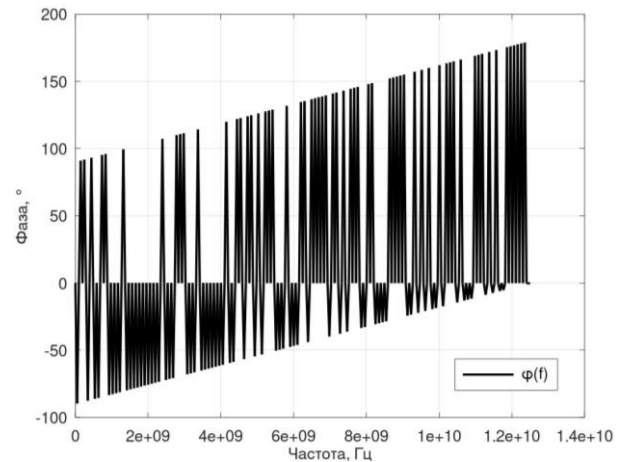


Рис. 16. Фазовый спектр преобразованного сигнала напряжения

Таблица 4. Значимые гармоники в спектре преобразованного напряжения

Частота, МГц	Амплитуда гармоники, В	Фаза гармоники, рад
48,8	0,542	0,0061
146,5	0,142	-3,12

Воспользовавшись методом наложения, рассчитаем значение тока в цепи индуктивного датчика как сумму гармоник тока при действии соответствующей гармоники ЭДС источника в модели (рис. 17).

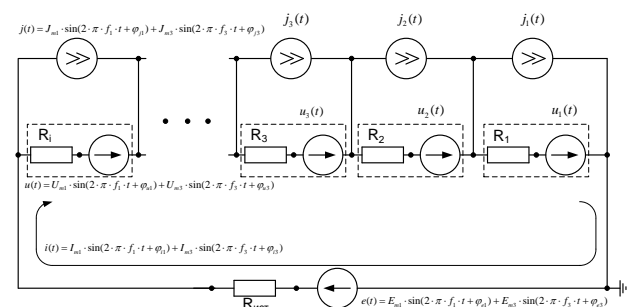


Рис. 17. Модель для определения тока через индуктивный датчик при действии в цепи несинусоидального источника ЭДС

Значения рассчитанных гармонических составляющих тока, протекающего через индуктивный датчик, показаны в табл. 5.

Таблица 5. Значения гармонических составляющих тока, протекающего через индуктивный датчик

Частота, МГц	Амплитуда гармоники, А	Фаза гармоники, рад
48,8	0,00274	-1,56
146,5	0,00016	1,59

Для определения величины кажущегося заряда проинтегрируем кривую изменения тока в течение четверти периода:

$$q_{\text{чр}} = \int_0^{t_1} (I_{m1} \cdot \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) + I_{m3} \times \\ \times \sin(2\pi f_3 t + \varphi_3)) dt = \int_0^{5 \cdot 10^{-9}} (0,542 \times \\ \times \sin(2\pi \cdot 48,8 \cdot 10^6 t + 0,006) + \\ + 0,142 \cdot \sin(2\pi \cdot 146,5 \cdot 10^6 t - 3,12)) dt = \\ = 1600 \text{ пКл},$$

где $t_1 = 5 \cdot 10^{-9}$ – момент времени, когда функция тока достигает своего максимального значения в течение первого полупериода.

Выбор временного интервала обусловлен тем, что основной вклад в перенос заряда при частичном разряде вносит первый полупериод импульса. Последующие колебания (связанные, например, с резонансом датчика) носят реактивный характер и не связаны непосредственно с энергией разряда. С учетом симметризации импульса интервал был сокращен до четверти периода.

Для определения точности результатов расчета был измерен уровень кажущегося заряда частичных разрядов при таких же условия, при которых был зарегистрирован сигнал напряжения, используемый для расчетов выше. В качестве средства измерения использовалась система MPD 600 фирмы Omicron с емкостным датчиком.

На рис. 18 показана величина кажущегося заряда, определенная с помощью прибора, которая составила 1,382 нКл, т. е. относительная разница с расчетным значением составила 13,6 %. Для оценки качества изоляции такая погрешность считается приемлемой, поскольку критическими являются значения кажущегося заряда частичных разрядов, отличающиеся на порядок.

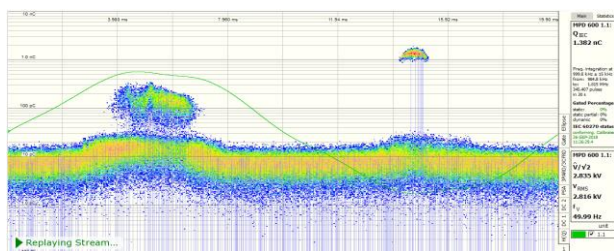


Рис. 18. Фазово-амплитудное распределение частичных разрядов и текущее значение кажущегося заряда частичных разрядов

В данном случае погрешность вызвана различием в технических средствах, которые использовались для измерений и, соответственно, с разной погрешностью измерительных систем. Кроме того, показано сравнение по единичному измерению, в то время как частичные разряды имеют стохастический характер. Наконец, в

модели присутствует ряд допущений, которые также приводят к погрешности в расчетах.

Таким образом, предложенная модель позволяет получить все необходимые характеристики датчика и самого разряда без градуировки измерительного канала.

Границы применимости модели определяются следующими факторами: квазистационарным приближением (т. е. не учитываются волновые процессы, что допустимо для рассматриваемого частотного спектра сигналов ЧР); упрощением геометрической конструкции датчика (в случае большой асимметрии погрешность может возрасти). Таким образом, предложенная модель наиболее эффективна при проектировании и анализе малогабаритных индуктивных датчиков (в том числе, бескаркасных), используемых для регистрации импульсов ЧР с частотным спектром до ~300–500 МГц без насыщаемых магнитных материалов и при отсутствии сильных внешних электромагнитных помех.

Выводы. Разработанная гибридная имитационная модель индуктивного датчика ЧР, объединяющая полевое и цепное моделирование, учитывает магнитное поле, создаваемое токами частичных разрядов, токи смещения в витках индуктивного датчика и внешнюю цепь, в которую он установлен.

Предложенная модель исключает необходимость градуировки измерительного канала для оценки характеристик частичных разрядов, кажущийся заряд при этом рассчитывается напрямую по физической модели датчика и зарегистрированному сигналу. Модель позволяет проектировать индуктивные датчики ЧР и анализировать их характеристики.

Точность модели подтверждена: погрешность расчета индуктивности 3,1 % считается допустимой для инженерных задач; относительная разница между единично взятым измеренным и расчетным значением кажущегося заряда частичных разрядов составила 13,6 %.

Модель универсальна: ее можно применять как для классических датчиков с сердечником, так и для современных решений без ферромагнетиков. Такие датчики удобно размещать в конструкции высоковольтного оборудования, в частности в электронных (цифровых) измерительных трансформаторах, подключая их последовательно в цепь заземления.

В дальнейшем планируется совершенствование модели с учетом реального размещения датчика, ее внедрение в системы автоматизированного мониторинга технического состояния изоляции, верификация при более длительных испытаниях различного вида.

Список литературы

1. Коробейников С.М., Вечеркин М.В. Физика возникновения, характеристика и классификация частичных разрядов в высоковольтном оборудовании //

Электротехнические системы и комплексы. – 2010. – № 18. – С. 204–212.

2. Kunicki M., Kabot O., Kozio M. Partial Discharge Diagnostics of High Voltage Instrument Transformers – Case study // 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). – Madrid, Spain, 2023. P. 1–5. DOI: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194710.

3. **Исследование** частотных характеристик индуктивных датчиков в схемах измерения частичных разрядов / А.В. Жуйков, П.А. Колпакова, Д.А. Матвеев и др. // Электричество. – 2023. – № 7. – С. 35–46. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-7-35-46. – EDN DGVVHX.

4. **О применении** высокоиндуктивных датчиков для измерения сигналов частичных разрядов электрическим методом в условиях заводских испытаний / А.В. Жуйков, П.А. Колпакова, Д.А. Матвеев и др. // Электричество. – 2023. – № 10. – С. 37–47. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-10-37-47. – EDN CYOCBK.

5. **Calibration** Methods of Partial Discharge Measuring for Online Insulation Diagnosis / A. Fujimoto, T. Harakawa, M. Takanezawa, H. Tsubakihara // 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). – Kitakyushu, Japan, 2022. P. 550–554. DOI: 10.23919/CMD54214.2022.9991632.

6. **Теоретические** основы электротехники: учебник для вузов: в 3 т. Т. 3 / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2003. – 377 с.

7. Mor A.R., Castro Heredia L.C. Practical frequency response characterization of a test circuit for partial discharge measurements // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – August 2018. – Vol. 25, No. 4. – P. 1535–1544. DOI: 10.1109/TDEI.2018.006884.

8. **Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.** Расчет индуктивностей: Справочная книга. – 3-е изд. – Ленинград: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с.

References

1. Korobeynikov, S.M., Vecherkin, M.V. Fizika vozniknoveniya, kharakteristika i klassifikatsiya chastichnykh razryadov v vysokovol'tnom oborudovanii [Physics of appearance, characterization and classification of partial discharges in high-voltage equipment].

Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы, 2010, no. 18, pp. 204–212.

2. Kunicki, M., Kabot, O., Kozio, M. Partial Discharge Diagnostics of High Voltage Instrument Transformers – Case study. 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). Madrid, Spain, 2023, pp. 1–5. DOI: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194710.

3. Zhuykov, A.V., Kolpakova, P.A., Matveev, D.A., Frolov, M.B., Khrenov, S.I. Issledovanie chastotnykh kharakteristik induktivnykh datchikov v skhemakh izmereniya chastichnykh razryadov [Studying the frequency characteristics of Inductive sensors used in partial discharge measurement circuits]. *Elektrichestvo*, 2023, no. 7, pp. 35–46. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-7-35-46. EDN DGVVHX.

4. Zhuykov, A.V., Kolpakova, P.A., Matveev, D.A., Nikulov, I.I., Frolov, M.B. O primeneniі vysokoinduktivnykh datchikov dlya izmereniya signalov chastichnykh razryadov elektricheskim metodom v usloviyakh zavodskikh ispytaniy [On the use of high-inductive sensors for partial discharge signals measurement by the electrical method in the factory test environment]. *Elektrichestvo*, 2023, no. 10, pp. 37–47. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-10-37-47. EDN CYOCBK.

5. Fujimoto, A., Harakawa, T., Takanezawa, M., Tsubakihara, H. Calibration Methods of Partial Discharge Measuring for Online Insulation Diagnosis. 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Kitakyushu, Japan, 2022, pp. 550–554. DOI: 10.23919/CMD54214.2022.9991632.

6. Demirchyan, K.S., Neyman, L.R., Kоровкин, N.V., Chechurin, V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki v 3 t., t. 3* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering in 3 vols., vol. 3]. Saint-Petersburg: Piter, 2003. 377 p.

7. Mor, A.R., Castro Heredia, L.C. Practical frequency response characterization of a test circuit for partial discharge measurements. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, August 2018, vol. 25, no. 4, pp. 1535–1544. DOI: 10.1109/TDEI.2018.006884.

8. Kalantarov, P.L., Tseytlin, L.A. *Raschet induktivnostey: spravochnaya kniga* [Inductance Calculations: Reference Book]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1986. 488 p.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 62-50

Александр Савельевич Глазырин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Россия, Томск; Тюменский индустриальный университет, профессор кафедры электроэнергетики, Россия, Тюмень, телефон (3822) 70-17-77, e-mail: asglazyrin@tpu.ru

Евгений Игоревич Попов

Тюменский индустриальный университет, аспирант кафедры кибернетических систем, ассистент кафедры электроэнергетики, Россия, Тюмень, e-mail: popovei72@mail.ru

Владимир Анатольевич Копырин

Тюменский индустриальный университет, кандидат технических наук, и.о. зав. кафедры кибернетических систем, доцент кафедры электроэнергетики, Россия, Тюмень, телефон (3452) 28-30-16, e-mail: kopyrinva@gmail.com

Методика проекционной идентификации параметров настраиваемой модели синхронного двигателя с постоянными магнитами и индикаторы информативности конечных фрагментов данных

Авторское резюме

Состояние вопроса. В условиях перевода нефтяных скважин в прерывистые режимы эксплуатации возникает необходимость построения замкнутых бездатчиковых систем управления электроприводами погружных установок, в том числе с синхронными двигателями с постоянными магнитами. Для реализации данных систем требуется разработка эффективных методов динамической идентификации параметров настраиваемой модели электродвигателя в связи с циклическим изменением теплового режима его работы. Существующие методы идентификации на сегодняшний день сталкиваются с проблемой высоких вычислительных затрат и отсутствием априорной информации о характере помех в измерительных каналах. Тем самым актуальной задачей является разработка новых робастных методов идентификации параметров настраиваемых моделей динамических систем, в частности погружного электропривода на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами.

Материалы и методы. Оценка электромагнитных параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами осуществлена с использованием методов идентификации параметров настраиваемых математических моделей нестационарных динамических систем. Для аппроксимации производной в дискретном времени использована неявная многошаговая разностная схема.

Результаты. Разработана методика проекционной идентификации параметров настраиваемых моделей динамических систем и апробирована на настраиваемой модели статора синхронного двигателя с постоянными магнитами для получения его электромагнитных параметров. Предложены индикаторы информативности конечного фрагмента данных на основе анализа геометрических характеристик ведущих гиперплоскостей в постановке задачи наименьших квадратов. Получены оценки электромагнитных параметров настраиваемой модели синхронного двигателя с постоянными магнитами с относительными ошибками оценивания в режиме частотного пуска на холостом ходу в 26 % и 78 % для активного сопротивления и индуктивности обмотки статора соответственно и в режиме работы под нагрузкой 5,5 % и 39 %. Полученный индикатор информативности конечного фрагмента данных на основе угла между ведущими гиперплоскостями позволяет оценивать обусловленность задачи без непосредственного вычисления собственных или сингулярных чисел информационной (симметричной, положительно-определенной) матрицы метода наименьших квадратов.

Выводы. Предложенные методика оценивания параметров настраиваемых моделей синхронного двигателя с постоянными магнитами и индикаторы информативности конечного фрагмента данных могут быть использованы для проектирования замкнутых систем электропривода погружных установок, находящихся в режиме прерывистой эксплуатации.

Ключевые слова: нестационарная динамическая система, настраиваемые модели, идентификация по малому числу наблюдений, метод наименьших квадратов, синхронный двигатель с постоянными магнитами, проекционная идентификация, ведущая гиперплоскость, проекционное сопровождение ведущей гиперплоскости, индикатор информативности

Aleksandr Savelievich Glazyrin

National Research Tomsk Polytechnic University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Power and Electrical Engineering Department of School of Energy and Power Engineering, Russia, Tomsk; Industrial University of Tyumen, Professor of Electrical Engineering Department, Russia, Tyumen, telephone (3822) 70-17-77, e-mail: asglazyrin@tpu.ru

Evgeniy Igorevich Popov

Industrial University of Tyumen, Postgraduate Student of Cybernetic Systems Department, Assistant Lecturer of Electrical Engineering Department, Russia, Tyumen, e-mail: popovei72@mail.ru

Vladimir Anatolievich Kopyrin

Industrial University of Tyumen, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Acting Head of Cybernetic Systems Department, Associate Professor of Electrical Engineering Department, Russia, Tyumen, telephone (3452) 28-30-16, e-mail: kopyrinva@gmail.com

Methodology for parameters projection identification of an adaptive permanent magnet synchronous motor and informativity indicators of finite data fragments

Abstract

Background. Under the conditions of transferring oil wells into intermittent operating modes, there is a need to develop closed sensorless control systems of electric drives of submersible installations, including those with synchronous motors with permanent magnets. To implement these systems, it is necessary to develop effective methods for dynamic identification of the parameters of the electric motor model in connection with the cyclic change in the thermal mode of its operation. Currently, existing identification methods face the problem of high computational costs and the lack of a priori information on the nature of interference in the measuring channels. Thus, the task to develop new robust methods to identify the parameters of adaptive models of dynamic systems, in particular, a submersible electric drive based on synchronous motors with permanent magnets, becomes relevant.

Materials and methods. The paper discusses methods to identify parameters of adaptive mathematical models of nonstationary dynamic systems using the example of estimating electromagnetic parameters of a permanent magnet synchronous motor. An implicit multistep difference scheme is used to approximate the derivative in discrete time.

Results. The authors have developed a methodology for projection identification of parameters of adaptive models of dynamic systems and have tested it on an adaptive model of a stator of a synchronous motor with permanent magnets to obtain its electromagnetic parameters. The informativity indicators of the finite data fragment are proposed based on the analysis of the geometric characteristics of the leading hyperplanes in the formulation of the least squares problem. The proposed methodology for parameters projection identification of an adaptive model of a synchronous motor with permanent magnets made it possible to obtain estimates of its electromagnetic parameters with relative estimation errors of 26 % and 78 % for the active resistance and inductance of the stator winding, respectively, in the idle frequency start mode and 5.5 % and 39 % for the load mode. The informativity indicator of the finite data fragment obtained is based on the angle between the leading hyperplanes. It makes it possible to estimate the conditionality of the problem without directly calculating the eigenvalues or singular values of the information (symmetric, positive-definite) matrix of the least squares method.

Conclusions. The obtained methods for parameters estimation of adaptive models of permanent magnet synchronous motor and informativity indicators of the finite data fragment can be used to design closed electric drive systems of submersible installations operating in intermittent operation mode.

Key words: non-stationary dynamic system, adaptive models, identification by a small number of observations, least squares method, permanent magnet synchronous motor, projection identification, leading hyperplane, projection tracking of the leading hyperplane, data informativity indicators

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.069-078

Введение. Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) получили широкое распространение в электроприводах общепромышленного назначения [1], в частности в

системах электропривода погружных установок центробежных электронасосов УЭЦН [2, 3]. В связи с распространенной практикой перевода нефтяных скважин в режимы прерывистой

эксплуатации в научно-технической литературе все чаще поднимаются вопросы оптимизации режимов работы скважин [4] и перехода на векторные бездатчиковые системы управления электроприводом [5]. Это связано со снижением надежности компонентов УЭЦН в прерывистых режимах вследствие существенного снижения времени разгона погружного электродвигателя (ПЭД) и возрастания крутильных колебаний [6]. Основным препятствием для широкого внедрения бездатчиковых векторных систем регулирования является отсутствие достоверной информации о параметрах схемы замещения погружной электрической машины для настройки регуляторов и систем оценивания неизмеряемых механических координат электропривода.

Учитывая специфику прерывистого режима эксплуатации скважины [7], для обеспечения эффективного управления параметры настраиваемых моделей электропривода должны динамически изменяться в течение всего цикла накопления и откачки жидкости. Кроме того, оценивание параметров должно вестись средствами цифрового сигнального процессора наземной станции управления, в связи с чем основным требованием к методу идентификации является его экономичность с точки зрения затрат вычислительных ресурсов. По существу, ставится задача динамической (текущей) идентификации параметров настраиваемых моделей электропривода с СДПМ по малому числу наблюдений [8].

Для оценки параметров схемы замещения СДПМ применяются известные методы на основе частотного анализа [9, 10], однако для их применения необходимы режимы заторможенного ротора, что делает данный класс методов более эффективным для задач предварительной идентификации. Известные методы адаптивного оценивания параметров статора [11, 12] имеют недостатки, основным из которых является необходимость качественного перехода от систем дифференциальных уравнений к системе разностных. Кроме того, измерения сигналов в реальной системе всегда сопровождаются наличием шумовой составляющей, в связи с чем адаптивные методы оказываются уязвимы к качеству организации измерительной системы и имеют большую эффективность для общепромышленных или прецизионных электроприводов.

Методы идентификации параметров на основе метаэвристических алгоритмов, такие как метод дифференциальной эволюции [13] или генетические алгоритмы [14, 15], несмотря на свою высокую эффективность в решении нелинейных задач оптимизации, в инженерной практике имеют значительные вычислительные затраты. В связи с чем метаэвристические методы мало подходят для задач динамической идентификации.

Ниже предлагается новый подход к оцениванию параметров динамических систем на примере синхронного двигателя с постоянными

магнитами, учитывающий ограничения в виде существенных помех измерений и необходимости экономии вычислительных затрат на каждом шаге дискретизации.

Постановка задачи, объект и методы исследования. Рассмотрим задачу идентификации (оценивания) параметров R , L электромагнитной подсистемы СДПМ на скользящем окне просмотра по доступным измерениям переменных состояния СДПМ (напряжение и ток статора, угловая скорость ротора) в постановке метода наименьших квадратов (МНК).

В качестве объекта исследования рассмотрим математическую модель синхронного двигателя с постоянными магнитами в ортогональной вращающейся синхронно с ротором dq -системе координат, которая в нормальной форме Коши имеет следующий вид [16]:

$$\begin{cases} \frac{di_d(t)}{dt} = \frac{1}{L} [U_d(t) - Ri_d(t) + L\omega_e(t)i_q(t)], \\ \frac{di_q(t)}{dt} = \frac{1}{L} [U_q(t) - Ri_q(t) - \\ - L\omega_e(t)i_d(t) - \psi_m\omega_e(t)], \\ \frac{d\omega_r(t)}{dt} = \frac{1}{J_\Sigma} \left[\frac{3}{2} Z_p i_q(t) \psi_m - M_c(t) \right], \end{cases} \quad (1)$$

где $U_d(t)$, $U_q(t)$ – проекции вектора входного напряжения в осях dq , В; $i_d(t)$, $i_q(t)$ – проекции вектора статора СДПМ в осях dq , А; R – активное сопротивление статорной обмотки СДПМ, Ом; L – индуктивность статорной обмотки СДПМ, Гн; ψ_m – потокосцепление постоянного магнита, Вб; Z_p – число пар полюсов СДПМ; $\omega_e(t)$ – электрическая угловая частота, $\omega_e = Z_p \omega_r$, рад/с; J_Σ – эквивалентный приведенный момент инерции вала СДПМ, кг·м².

При составлении модели были приняты следующие допущения [17]:

- 1) рассматривается неявнополюсная синхронная машина;
- 2) статорная обмотка симметрична;
- 3) магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами ротора, не зависит от токов статора и принимается постоянным во времени;
- 4) питание осуществляется от симметричного идеального источника трехфазного напряжения;
- 5) в магнитной цепи синхронной машины отсутствуют насыщение, гистерезис и вихревые токи;

- 6) ЭДС СДПМ принимается синусоидальной.

Поскольку получение оценок параметров настраиваемой модели СДПМ необходимо для качественной настройки регуляторов в системе векторного управления, предположим, что изначально регулятор скорости из-за отсутствия достоверных оценок настраиваемой модели СДПМ имеет некачественную

настройку, что приводит к остаточному отклонению по угловой скорости ротора СДПМ при набросе нагрузки. Кроме того, положим, что измерительные каналы по переменным состояниям и входным сигналам напряжения задания подвержены внешним помехам. Для этого будем предполагать, что для решения задачи оценивания доступна аддитивная смесь реального сигнала переменной состояния СДПМ и помех измерений вида $y_{изм}(t) = y(t) + \xi(t)$. Величина $\xi(t)$ подчиняется гауссовскому закону распределения [18]:

$$p_G(\xi) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\xi - m_\xi)^2}{2\sigma_y^2}}, \quad (2)$$

где m_ξ – математическое ожидание случайной величины ξ , $m_\xi = 0$; σ_y – среднеквадратичное отклонение для заданного сигнала y .

Среднеквадратичные отклонения для гауссовского распределения помех (2) приняты равными: по напряжению $\sigma_U = 20$ В; по току $\sigma_i = 2$ А; по угловой скорости ротора $\sigma_\omega = 5$ рад/с.

Осциллограммы переходных характеристик по напряжению и току во вращающейся синхронно с ротором dq -системе координат и характеристик по угловой скорости представлены на рис. 1.

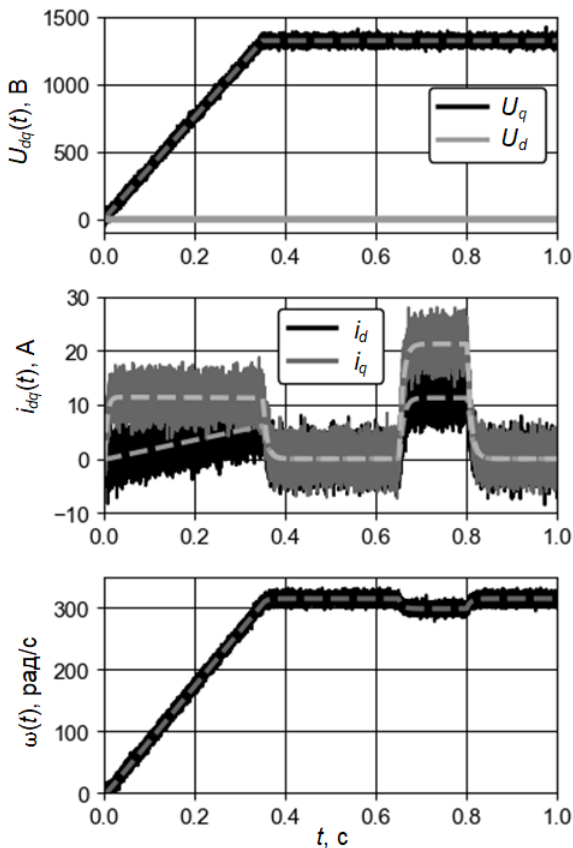


Рис. 1. Осциллограммы модельных измерений переходных характеристик

«Точные» характеристики переменных на рис. 1 обозначены пунктирными линиями. Моделирование выполнено в следующих режимах: 0..0,35 с – частотный пуск на холостом ходу; 0,65..0,8 с – работа в режиме номинальной нагрузки.

Выделим отдельно из системы (1) уравнение равновесия статора по оси q и перепишем ее в виде настраиваемой модели:

$$\frac{di_q(t)}{dt} = \begin{pmatrix} \hat{K}_{ЭМ1} [U_q(t) - \psi_m \omega_e(t)] + \\ + \hat{K}_{ЭМ2} i_q(t) - \omega_e(t) i_d(t) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где знак над переменной « $\hat{}$ » – символ оценки; $\hat{K}_{ЭМ1}$, $\hat{K}_{ЭМ2}$ – искомые коэффициенты модели, зависящие от времени, которые в дискретной форме имеют вид

$$\hat{K}_{ЭМ}(k) = \begin{pmatrix} \hat{K}_{ЭМ1}(k) \\ \hat{K}_{ЭМ2}(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\hat{R}(k) \\ \hat{L}(k) & -\hat{L}(k) \end{pmatrix}^T, \quad (4)$$

где k – шаг дискретизации.

Поскольку для решения задачи оценивания параметров доступны только дискретные замеры сигналов с АЦП, которые собираются в конечный фрагмент данных – скользящее окно просмотра, необходима дискретная форма настраиваемой модели (3). Основной проблемой при переходе из непрерывного времени в дискретное является численная аппроксимация производной. Известны различные методы перехода в дискретное время, такие как явный и неявный методы Эйлера, метод билинейной аппроксимации [19], различающиеся точностью аппроксимации динамических процессов во временной и частотной областях [20]. Однако для решения этой задачи также возможно применение многшаговых методов аппроксимации, предназначенных для решения задачи Коши в области систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Это позволяет на малом числе наблюдений получить более высокую обусловленность задачи оценивания, что в отсутствие априорных статистических предположений имеет наибольшее влияние на точностные свойства методов оценивания в МНК-постановке [8, 21].

Для обеспечения высокой эффективности решения задачи оценивания электромагнитных параметров настраиваемой модели СДПМ с точки зрения информативности конечных фрагментов ретроспективных данных и точностных свойств оценок параметров относительно эталонных дискретную настраиваемую модель СДПМ получим путем дискретизации уравнений (2) с помощью неявного метода Милна 4-го порядка [21]:

$$\left\{ \begin{aligned} F_{ЭМ}(k) &= \hat{K}_{ЭМ1} F_U(k) + \hat{K}_{ЭМ2} F_I(k), \\ F_{ЭМ}(k) &= \begin{pmatrix} \frac{8}{3T_d} (i_q(k) - i_q(k-3)) + \\ \omega_e(k) i_d(k) + 3\omega_e(k-1) i_d(k-1) + \\ + 3\omega_e(k-2) i_d(k-2) + \\ \omega_e(k-3) i_d(k-3) \end{pmatrix}, \\ F_U(k) &= \begin{pmatrix} [U_q(k) - \psi_m \omega_e(k)] + \\ + 3[U_q(k-1) - \psi_m \omega_e(k-1)] + \\ + 3[U_q(k-2) - \psi_m \omega_e(k-2)] + \\ + [U_q(k-3) - \psi_m \omega_e(k-3)] \end{pmatrix}, \\ F_I(k) &= i_q(k) + 3i_q(k-1) + 3i_q(k-2) + i_q(k-3). \end{aligned} \right. \quad (5)$$

На основе системы разностных уравнений (4) составим систему линейных алгебраических уравнений в МНК-постановке на конечном фрагменте ретроспективных данных:

$$\mathbf{X}_{ЭМ}^T(k) \mathbf{X}_{ЭМ}(k) \hat{\mathbf{K}}_{ЭМ}(k) = \mathbf{X}_{ЭМ}^T(k) \mathbf{y}_{ЭМ}(k), \quad (6)$$

где матрица регрессов $\mathbf{X}_{ЭМ}(k)$ и вектор правой части системы нормальных уравнений $\mathbf{y}_{ЭМ}(k)$ на каждом k -м шаге дискретизации вычисляются по выражениям:

$$\mathbf{X}_{ЭМ}(k) = \begin{pmatrix} F_U(k) & F_I(k) \\ F_U(k-1) & F_I(k-1) \\ \vdots & \vdots \\ F_U(k-n) & F_I(k-n) \end{pmatrix}; \quad (7)$$

$$\mathbf{y}_{ЭМ}(k) = \begin{pmatrix} F_{ЭМ}(k) \\ F_{ЭМ}(k-1) \\ \vdots \\ F_{ЭМ}(k-n) \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где n – длина фрагмента ретроспективных данных.

Искомый вектор оценок $\hat{\mathbf{K}}_{ЭМ}$ для системы (6) может быть получен различными методами итерационного решения систем линейных алгебраических уравнений. Однако нахождение «точного» псевдорешения переобусловленной СЛАУ на каждом шаге сопряжено со следующими проблемами:

1) классические итерационные алгоритмы могут оказаться неустойчивыми, и при движении окна просмотра на каждом шаге дискретизации результатом выполнения алгоритма станет расходящийся процесс, а значит, оценки параметров не будут найдены и задача идентификации оказывается нерешенной, что может привести к потере устойчивости замкнутой системы управления;

2) при решении задачи идентификации методом наименьших квадратов не приводится никакой априорной информации относительно оши-

бок измерений, при этом на малом числе наблюдений классические гипотезы об эффективности и несмещенности оценки, полученной методом наименьших квадратов, не подтверждаются, а значит, псевдорешение СЛАУ будет гарантированно смещено относительно глобального экстремума.

Как правило, методы адаптивной идентификации представляют собой рекуррентные выражения. К таким методам можно отнести рекуррентный метод наименьших квадратов, алгоритм Роббинсона-Монро, алгоритм Качмажа и его модификации [22]. Данные методы направлены на «решение» СЛАУ в МНК-постановке, т. е. на итерационный поиск коэффициентов, минимизирующих квадрат невязки между выходом системы и дискретной моделью. Однако если условия несмещенности и эффективности полученных оценок параметров нарушается, то на каждом шаге итерационного процесса поиска в пространстве коэффициентов решение сходится к некоторому локальному (т. е. минимуму данной конкретной МНК-задачи на текущем шаге дискретизации), а не глобальному (точному) экстремуму.

Для решения задачи оценивания сформулируем следующие требования:

1) устойчивость итерационного процесса оценивания в смысле ограниченности по норме вектора искомых коэффициентов;

2) относительно малые вычислительные затраты на поиск решения при составленных СЛАУ.

Таковыми свойствами обладает, например, метод Качмажа или другие методы, использующие подпространства Крылова [23], основанные на процессе последовательного приближения к решению путем проведения проекций на гиперплоскости, которые заданы уравнениями системы. Поскольку даже при непосредственном решении уравнения (6) любым из данных методов оценки будут иметь смещение относительно глобального экстремума, для решения задачи оценивания параметров по малому числу наблюдений данный подход может быть упрощен с точки зрения уменьшения количества шагов проведения проекций при МНК-постановке задачи на каждом шаге оценивания.

Методика проекционной идентификации и индикаторы информативности данных. Введем следующие обозначения:

$$\mathbf{A}_{ЭМ}(k) = \mathbf{X}_{ЭМ}^T(k) \mathbf{X}_{ЭМ}(k); \quad \mathbf{b}_{ЭМ}(k) = \mathbf{X}_{ЭМ}^T(k) \mathbf{y}_{ЭМ}(k).$$

Тогда система (5) может быть представлена в следующем виде:

$$\mathbf{A}_{ЭМ}(k) \hat{\mathbf{K}}_{ЭМ}(k) = \mathbf{b}_{ЭМ}(k). \quad (9)$$

Идея методики состоит в выборе только одной из совокупности гиперплоскостей системы (9), которую в дальнейшем будем называть ведущей. Для организации итерационного процесса оценивания параметров настраивае-

мой модели на каждом шаге дискретизации к ведущей гиперплоскости проводится проекция. На рис. 2 приведена поясняющая иллюстрация при размерности пространства коэффициентов $\hat{\mathbf{K}}_{ЭМ} \in \mathbb{R}_+^2$, где коэффициенты и смещение ведущей гиперплоскости в пространстве искомых параметров отмечены пунктирной линией.

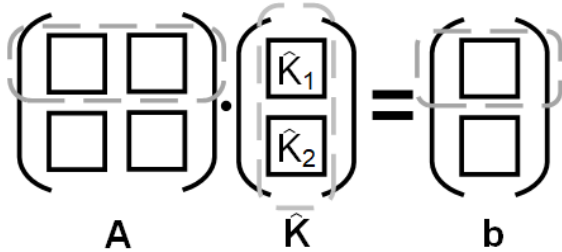


Рис. 2. Схема выбора ведущей гиперплоскости

Методика проекционной идентификации параметров настраиваемой модели синхронного двигателя с постоянными магнитами с сопровождением ведущей гиперплоскости состоит из следующих шагов:

1) выбираются вектор начального приближения $\hat{\mathbf{K}}_{ЭМ}(0)$ и ведущая гиперплоскость (номер строки h симметричной положительно определенной информационной матрицы \mathbf{A} и вектора правой части \mathbf{b}); выбранный номер ведущей гиперплоскости назначается на *весь период* работы алгоритма;

2) при заданной частоте дискретизации выбирается длина окна просмотра n , включающего в себя $n+m$ замеров мгновенных значений сигналов тока, напряжения и угловой скорости ротора (глубина задержки m определяется выбранным методом дискретизации, для выбранного в настоящем исследовании неявного метода Милна 4-го порядка полагаем $m = 3$) [21];

3) составляются системы линейных алгебраических уравнений в МНК-постановке (9);

4) определяются значения параметров электромагнитной подсистемы:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{K}}_{ЭМ}(k) = \hat{\mathbf{K}}_{ЭМ}(k-1) + \frac{q(k)}{\|\mathbf{A}_{ЭМ}^{(h)}(k)\|_2^2} \cdot \mathbf{A}_{ЭМ}^{(h)}(k), \\ q(k) = \mathbf{b}_{ЭМ}^{(h)}(k) - \mathbf{A}_{ЭМ}^{(h)}(k) \cdot \hat{\mathbf{K}}_{ЭМ}(k-1); \end{cases} \quad (10)$$

5) при получении новых данных от АЦП удаляются наиболее ранние замеры из окна просмотра, окно просмотра смещается на один шаг дискретизации;

6) в память включаются новые данные, и повторяются шаги 2–5.

Таким образом, решением задачи идентификации параметров настраиваемой модели СДПМ по малому числу наблюдений является не непосредственное решение системы (9) в классическом (общепринятом)

смысле минимизации квадрата невязки, а проекционное сопровождение ведущей гиперплоскости. Оценивание параметров организовано на основе конечного фрагмента ретроспективных данных (по малому числу наблюдений) путем однократного проведения проекции к ведущей гиперплоскости и нахождении координат точки пересечения.

Проведем апробацию методики проекционной идентификации на скользящем окне просмотра для СДПМ марки ПВЭДН 42-1280, параметры настраиваемой модели которого представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры СДПМ

Наименование параметра	Значение
Номинальное напряжение $U_{ном}$, В	1470/ $\sqrt{3}$
Номинальная мощность $P_{ном}$, кВт	42
Активное сопротивление обмотки статора R , Ом	2,528
Индуктивность обмотки статора L , мГн	4,5
Удельная ЭДС вращения E , В/(об/мин)	0,440
Эквивалентный момент инерции J , кг·м ²	0,08
Число пар полюсов Z_p	1

Длина конечного фрагмента ретроспективных данных (окна просмотра) принята равной 3000 точек. Частота дискретизации – 40 кГц. Переходные характеристики оценок активного сопротивления и индуктивности обмотки статора предложенной методикой проекционной идентификации представлены на рис. 3, где первые 0,075 с оценки параметров приняты равными нулю, так как окно просмотра еще не было сформировано.

Выполним расчет относительных ошибок оценивания обоих параметров в каждом из режимов работы СДПМ по следующим формулам:

$$\Delta R = \frac{\sum_{j=j_{нач}}^{j_{кон}} \hat{R}_j}{j_{кон} - j_{нач} + 1} - R \cdot 100\%; \quad (11)$$

$$\Delta L = \frac{\sum_{j=j_{нач}}^{j_{кон}} \hat{L}_j}{j_{кон} - j_{нач} + 1} - L \cdot 100\%, \quad (12)$$

где $j_{нач}$, $j_{кон}$ – пределы суммирования, выбираются по номеру шагов дискретизации, ограничивающих модельный режим работы СДПМ при данной частоте дискретизации.

Результаты расчетов сведем в табл. 2.

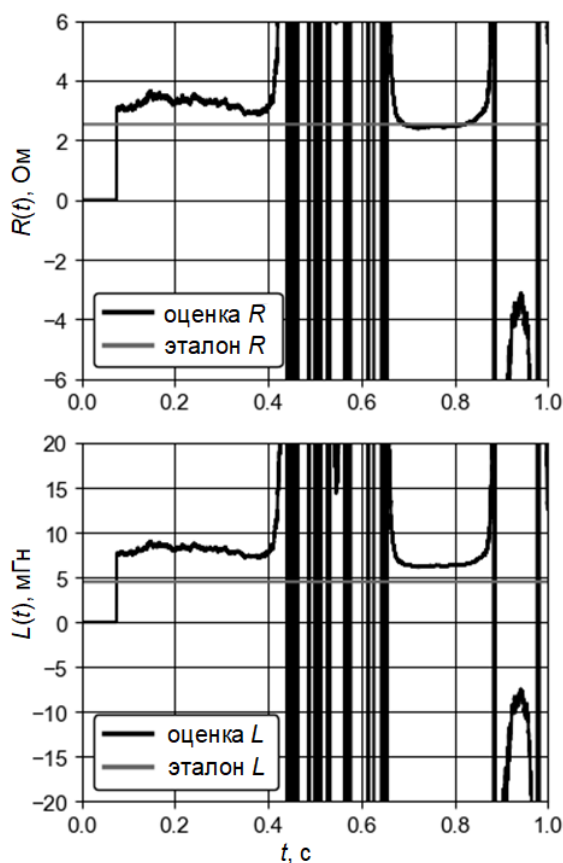


Рис. 3. Переходные характеристики оценок активного сопротивления и индуктивности обмотки статора СДПМ

В задачах оценивания параметров по малому числу наблюдений основным свойством конечного фрагмента данных, влияющим на точностные характеристики процесса оценивания, является степень его информативности. Как правило, степень информативности данных оценивается с помощью числа обусловленности информационной матрицы \mathbf{A} или расчетом других индикаторов информативности [8].

Таблица 2. Расчет средних значений и относительных ошибок оценивания параметров

Режим	\hat{R} , Ом	ΔR , %	\hat{L} , мГн	ΔL , %
Частотный пуск на XX 0..0,35 с	3,2	26	8	78
Работа на XX 0,4..0,65 с	1,23	-51	3,1	-31
Работа при номинальной нагрузке 0,7..0,8 с	2,4	-5,5	6,3	39
Работа на XX 0,8..1,0 с	12,7	402	32	609

Согласно предложенной методике проекционной идентификации с сопровождением ведущей гиперплоскости, углы между гиперплоскостями самой МНК-задачи, а также ведущими гиперплоскостями «соседних»

МНК-задач могут быть использованы в качестве индикаторов информативности данных на каждом шаге дискретизации. Индикаторы информативности по углу и длине проекции между ведущими гиперплоскостями соответственно вычисляются по формулам:

$$\theta(k) = \arccos \frac{|\mathbf{A}^{(h)}(k) \cdot \mathbf{A}^{(h)}(k-1)|}{\|\mathbf{A}^{(h)}(k)\|_2 \cdot \|\mathbf{A}^{(h)}(k-1)\|_2}; \quad (13)$$

$$I_{\text{пр}}(k) = \|\hat{\mathbf{K}}(k) - \hat{\mathbf{K}}(k-1)\|_2. \quad (14)$$

Для оценки эффективности предложенных индикаторов информативности выполним их расчет на участке моделирования от 0,075 с до 1 с в процессе оценивания параметров настраиваемой модели СДПМ и сравним полученные результаты с характеристиками изменения числа обусловленности информационной матрицы по формуле

$$\text{cond}[\mathbf{A}](k) = \frac{\lambda_{\max}[\mathbf{A}](k)}{\lambda_{\min}[\mathbf{A}](k)}, \quad (15)$$

где λ_{\max} , λ_{\min} – наибольшее и наименьшее собственные (или сингулярные) числа матрицы \mathbf{A} .

Переходные характеристики индикаторов информативности (12) и (13) в сравнении с изменением числа обусловленности информационной матрицы изображены на рис. 4.

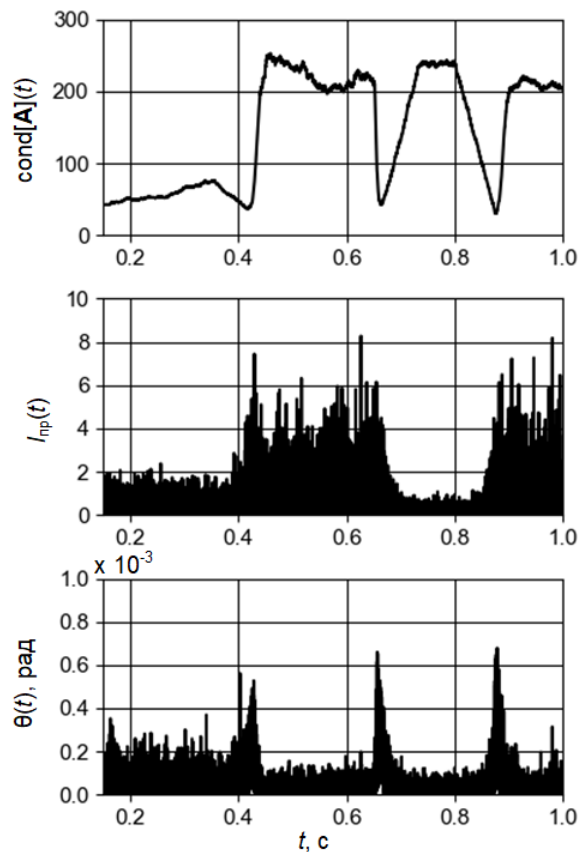


Рис. 4. Переходные характеристики индикаторов информативности данных

Обсуждение результатов. Анализ полученных данных (рис. 3 и табл. 2) показывает, что наибольшая точность оценивания параметров настраиваемой модели статора (2) достигается в режимах частотного пуска на холостом ходу (26 % и 78 %) и работы под нагрузкой (–5,5 % и 39 %). В режиме работы на холостом ходу оценки имеют высокую дисперсию, однако средние значения оценок и их относительных ошибок в –51 % и –31 % для активного сопротивления и индуктивности соответственно позволяют сделать вывод, что в характеристиках оценок есть тренд, который должен быть выделен более сложными методами [24], чем фильтр скользящего среднего.

Переходная характеристика числа обусловленности (рис. 4) показывает, что в переходных режимах обусловленность задачи выше [8]. Однако прямая корреляция между точностью оценивания параметров предложенной методикой проекционной идентификации и обусловленностью задачи отсутствует. Сравнение осциллограммы для числа обусловленности $\text{cond}[\mathbf{A}](t)$ и длины проекции $l_{\text{пр}}(t)$ показывает, что на точность оценивания влияет не только текущее значение числа обусловленности, но и скорость его изменения, так как при переходе в установившийся режим работы под нагрузкой оценки параметров не потеряли свои точностные свойства.

Согласно предложенной методике проекционной идентификации, задача оценивания параметров решается выполнением операции проектирования на ведущую гиперплоскость. Участки времени с более низким числом обусловленности соответствуют более высоким значениям угла между ведущими гиперплоскостями соседних МНК-задач (рис. 4.) Следовательно, при итеративном оценивании параметров на скользящем окне просмотра данный параметр может быть использован в качестве индикатора информативности конечного фрагмента данных вместо непосредственного вычисления числа обусловленности, что позволит снизить вычислительные затраты на оценку информативности фрагмента по малому числу наблюдений.

Выводы. В условиях перевода нефтяных скважин в прерывистые режимы эксплуатации возникает задача синтеза векторных бездатчиковых систем управления электроприводом погружной установки с синхронными двигателями с постоянными магнитами. При этом для качественного и эффективного управления электроприводом необходима реализация систем динамического оценивания его параметров на сравнительно малом конечном фрагменте доступных зашумленных измерений.

Предложенная и апробированная новая методика проекционной идентификации настраиваемой модели статора СДПМ позволяет выполнять динамическое оценивание его параметров

на скользящем окне просмотра. Основным преимуществом предложенного подхода является устойчивый процесс оценивания даже в условиях снижения обусловленности задачи, что является основной характеристикой, влияющей на точностные свойства оценок в условиях отсутствия априорной информации о характере помех измерений.

Индикаторы информативности на основе длин проекций и углов между ведущими гиперплоскостями на каждом шаге оценивания, предложенные для оценки информативности конечного скользящего фрагмента данных в задачах оценивания параметров, позволяют оценить обусловленность текущей задачи без непосредственного вычисления собственных или сингулярных чисел информационной матрицы, что существенно снижает вычислительные затраты микроконтроллера. Полученные результаты необходимы для проектирования замкнутых систем электропривода погружных установок с СДПМ, находящихся в режиме прерывистой эксплуатации.

Список литературы

1. Панкратов В.В. Вентильный электропривод: от стиральной машины до металлорежущего станка и электровоза // Электронные компоненты. – 2007. – № 2. – С. 68–77.
2. Воеков В.Н., Мещеряков В.Н., Крюков О.В. Вентильный электропривод для погружных нефтяных насосов с импульсным преобразователем напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты и релейным управлением инвертора напряжения // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 110–119.
3. Карпюк А.В. Энергоэффективные УЭЦН с вентильными электродвигателями // Инженерная практика. – 2017. – № 5. – С. 14–19.
4. Тагирова К.Ф., Нугаев И.Ф. Концептуальные основы автоматизации управления установками электроцентробежных насосов нефтедобывающих скважин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Т. 21, № 2. – С. 102–109.
5. Кладиев С.Н. Обзор и критический анализ современного состояния и путей совершенствования систем электропитания и автоматического управления установок электроцентробежных насосов в прерывистых режимах эксплуатации нефтяных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 9. – С. 203–215.
6. Надежность погружных нефтяных насосов при периодической эксплуатации / Е.А. Лихачёва, В.Г. Островский, Н.А. Лыкова, А.Н. Мусинский, П.А. Байдаров // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6, № 1. – С. 54–58.
7. Уразов К.Р., Рукин М.В., Борисов А.О. Моделирование тепловых процессов в погружном двигателе электроцентробежного насоса, работающего в периодическом режиме // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 4. – С. 62–71.

8. **Фурсов В.А.** Идентификация систем по малому числу наблюдений. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 81 с.

9. **Авдеев А.С., Осипов О.И.** Идентификация электрических параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 3(52). – С. 38–46.

10. **Авдеев А.С., Осипов О.И.** Идентификация параметров синхронных двигателей с постоянными магнитами на основе их частотного анализа // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2020. – Т. 174, № 1. – С. 8–14.

11. **Базылев Д.Н., Бобцов А.А., Пыркин А.А., Чежин М.С.** Алгоритмы идентификации параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 3. – С. 193–198.

12. **Вдовин В.В.** Адаптивные алгоритмы оценивания координат бездатчиковых электроприводов переменного тока с расширенным диапазоном регулирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / НГТУ. – Новосибирск, 2014. – 246 с.

13. **Double** update intelligent strategy for permanent magnet synchronous motor parameter identification / S. Zhou, D. Wang, M. Du, et al. // Computers, Materials and Continua. – 2022. – Vol. 74, No. 2. – P. 3391–3404.

14. **Gao Y., Wang X., Chen Q.** Characteristic model-based adaptive control with genetic algorithm estimators for four-PMSM synchronization system // International Journal of Control, Automation and Systems. – 2020. – Vol. 18. – P. 1605–1616.

15. **Liu K., Zhu Z.Q.** Quantum genetic algorithm based parameter estimation of PMSM under variable speed control accounting for system identifiability and VSI nonlinearity // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Vol. 62, No. 4. – P. 2363–2371.

16. **Виноградов А.Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново, 2008. – 298 с.

17. **Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хорьков В.А.** Электрические машины (специальный курс). – М.: Высш. шк, 1987. – 287 с.

18. **Васюков В.Н.** Общая теория связи. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 580 с.

19. **Белодедов М.В.** Методы проектирования цифровых фильтров. – Волгоград: Изд-во Волгоградского государственного университета, 2004. – 64 с.

20. **Сравнительный** анализ частотных характеристик вариантов построения цифровых моделей фильтров нижних частот компонентов электротехнических комплексов / А.С. Глазырин, Е.И. Попов, С.С. Попов и др. // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2024. – Т. 2, № 3. – С. 9–19.

21. **Попов Е.И., Глазырин А.С., Копырин В.А.** Влияние методов дискретизации на обусловленность информационной матрицы и характер формирования гиперсфер ошибок в задачах оценивания параметров по малому числу наблюдений // Системы анализа и обработки данных. – 2025. – Т. 97, № 1. – С. 85–104.

22. **Коновалов В.И.** Идентификация и диагностика систем. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 163 с.

23. **Баландин М.Ю., Шурина Э.П.** Методы Решения СЛАУ большой размерности. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 70 с.

24. **Синицын И.Н.** Фильтры Калмана и Пугачева. – М.: Университетская книга; Логос, 2006. – 640 с.

References

1. Pankratov, V.V. Ventil'nyy elektroprivod: ot stiral'noy mashiny do metallovezhushchego stanka i elektrovoza [Valve electric drive: from washing machine to metal-cutting machine and electric locomotive]. *Elektronnyye komponenty*, 2007, no. 2, pp. 68–77.

2. Voekov, V.N., Meshcheryakov, V.N., Kryukov, O.V. Ventil'nyy elektroprivod dlya pogruzhnykh neftnykh nasosov s impul'snym preobrazovatelem napryazheniya v zvone postoyannogo toka preobrazovatelya chastoty i releynym upravleniem invertora napryazheniya [Valve electric drive for submersible oil pumps with pulse voltage converter in the DC link of the frequency converter and relay control of the voltage inverter]. *Vestnik YuUrGU. Seriya Energetika*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 110–119.

3. Karpyuk, A.V. Energoeffektivnye UETsN s ventil'nymi elektrodvigatelyami [Energy-efficient ESPs with valve electric motors]. *Inzhenernaya praktika*, 2017, no. 5, pp. 14–19.

4. Tagirova, K.F., Nugaev, I.F. Kontseptual'nye osnovy avtomatizatsii upravleniya ustanovkami elektrosentrobezhnykh nasosov nefte dobyvayushchikh skvazhin [Actual Tasks of Oil-Wells Electric Submersible Pump Control Automation]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 102–109.

5. Kladiev, S.N. Obzor i kriticheskiy analiz sovremennogo sostoyaniya i putey sovershenstvovaniya sistem elektropitaniya i avtomaticheskogo upravleniya ustanovok elektrosentrobezhnykh nasosov v preryvistykh rezhimakh ekspluatatsii neftnykh skvazhin [Review and critical analysis of the current state and ways to improve regulated power supplies and automatic control systems for electric centrifugal pumping units in intermittent operation of oil wells]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*, 2023, vol. 334, no. 9, pp. 203–215.

6. Likhacheva, E.A., Ostrovskiy, V.G., Lykova, N.A., Musinskiy, A.N., Baydarov, P.A. Nadezhnost' pogruzhnykh neftnykh nasosov pri periodicheskoy ekspluatatsii [Oil submersible pumps reliability during cyclic operation]. *PROneft'. Professional'no o nefti*, 2021, vol. 6, no. 1, pp. 54–58.

7. Urazakov, K.R., Rukiv, M.V., Borisov, A.O. Modelirovanie teplovykh protsessov v pogruzhnom dvigatele elektrosentrobezhnogo nasosa, rabotayushchego v periodicheskom rezhime [Simulation of thermal processes in a submersible motor of an electric centrifugal pump operating in a periodic mode]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*, 2023, vol. 334, no. 4, pp. 62–71.

8. Fursov, V.A. *Identifikatsiya sistem po malomu chislu nablyudeniy* [Identification of systems with a small number of observations]. Samara: Izdatel'stvo SGAU, 2007. 81 p.

9. Avdeev, A.S., Osipov, O.I. Identifikatsiya elektricheskikh parametrov sinkhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami [Identification of electrical parameters of a permanent magnet synchronous motor]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy*, 2021, no. 3(52), pp. 38–46.

10. Avdeev, A.S., Osipov, O.I. Identifikatsiya parametrov sinkhronnykh dvigateley s postoyannymi magnitami na osnove ikh chastotnogo analiza [Identification of

parameters of permanent magnet synchronous motors based on their frequency analysis]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM*, 2020, vol. 174, no. 1, pp. 8–14.

11. Bazylev, D.N., Bobtsov, A.A., Pyrkin, A.A., Chezhin, M.S. Algoritmy identifikatsii parametrov sinkhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami [Algorithms for identifying parameters of a permanent magnet synchronous motor]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 193–198.

12. Vdovin, V.V. *Adaptivnye algoritmy otsenivaniya koordinat bezdatchikovykh elektroprivodov peremennogo toka s rasshirennym diapazonom regulirovaniya*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Adaptive algorithms for estimating coordinates of sensorless AC electric drives with an extended control range. Cand. tech. sci. diss.]. Novosibirsk, 2014. 246 p.

13. Zhou, S., Wang, D., Du, M., Li, Y., Cao, S. Double update intelligent strategy for permanent magnet synchronous motor parameter identification. *Computers, Materials and Continua*, 2022, vol. 74, no. 2, pp. 3391–3404.

14. Gao, Y., Wang, X., Chen, Q. Characteristic model-based adaptive control with genetic algorithm estimators for four-PMSM synchronization system. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2020, vol. 18, pp. 1605–1616.

15. Liu, K., Zhu, Z.Q. Quantum genetic algorithm based parameter estimation of PMSM under variable speed control accounting for system identifiability and VSI nonlinearity. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 62, no. 4, pp. 2363–2371.

16. Vinogradov, A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector control of AC electric drives]. Ivanovo, 2008. 298 p.

17. Sipaylov, G.A., Kononenko, E.V., Khor'kov, V.A. *Elektricheskie mashiny (specialnyj kurs)* [Electrical Machines (Special Course)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1987. 287 p.

18. Vasyukov, V.N. *Obshchaya teoriya svyazi* [General theory of communication]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2017. 580 p.

19. Belodedov, M.V. *Metody proektirovaniya tsifrovyykh fil'trov* [Digital Filter Design Methods]. Volgograd: Izdatel'stvo Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta, 2004. 64 p.

20. Glazyrin, A.S., Popov, E.I., Popov, S.S., Kopyrin, V.A., Kladiev, S.N., Leonov, A.P., Voronina, N.A., Kovalev, V.Z. Sravnitel'nyy analiz chastotnykh kharakteristik variantov postroyeniya tsifrovyykh modeley fil'trov nizhnikh chastot komponentov elektrotekhnicheskikh kompleksov [Comparative analysis of frequency responses of options for constructing low-pass filters of electrical systems digital models]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Promyshlennaya kibernetika*, 2023, vol. 2, no. 3, pp. 9–19.

21. Popov, E.I., Glazyrin, A.S., Kopyrin, V.A. Vliyanie metodov diskretizatsii na obuslovlennost' informatsionnoy matritsy i kharakter formirovaniya gipersfer oshibok v zadachakh otsenivaniya parametrov po malomu chislu nablyudeniy [The influence of discretization methods on the conditionality of the information matrix and the nature of the formation of error hyperspheres in problems of parameter estimation based on a small number of observations]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh*, 2025, vol. 97, no. 1, pp. 85–104.

22. Konovalov, V.I. *Identifikatsiya i diagnostika sistem* [Identification and diagnostics of systems]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2010. 163 p.

23. Balandin, M.Yu., Shurina, E.P. *Metody resheniya SLAU bol'shoy razmernosti* [Methods for Solving Large-Dimensional SLAEs]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2000. 70 p.

24. Sinitsyn, I.N. *Fil'try Kalmana i Pugacheva* [Kalman and Pugachev filters]. Moscow: Universitetskaya kniga; Logos, 2006. 640 p.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.311.22

Владимир Павлович Жуков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Антон Николаевич Беляков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, заведующий кафедрой прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: ab_pm@mail.ru

Сергей Дмитриевич Горшенин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, заведующий кафедрой тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-34,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Сергей Андреевич Смирнов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45,

Моделирование колебательного движения пузырька газа в слое жидкости

Авторское резюме

Состояние вопроса. Тепловые и химические процессы в газожидкостных реакторах часто реализуются при сложном характере движения компонентов, который во многом определяет время процесса, площадь контакта фаз и, соответственно, эффективность и скорость протекания тепловых и химических процессов в технологических установках. Особый интерес у исследователей вызывают наблюдаемые в опытах колебания скорости движения пузырьков газа в газожидкостных реакторах, которые существенным образом влияют на эффективность и продолжительность анализируемых процессов. В связи с этим разработка моделей движения пузырьков газа в слое жидкости, учитывающих колебания скорости, представляется актуальной задачей с точки зрения совершенствования анализируемых процессов.

Материалы и методы. Постановка и решение задачи динамики движения выполнены на основе дифференциальных уравнений движения пузырьков и методов решения этих уравнений.

Результаты. Построена модель движения пузырьков газа в слое жидкости, в которой пузырек пара представлен совокупностью двух подсистем, одна из которых совершает поступательное, а вторая – колебательное движение. В результате решения дифференциальных уравнений движения подсистем получены и исследованы зависимости скорости движения пузырьков газа от времени в активной зоне реактора. На базе полученных решений разработаны рекомендации для повышения эффективности тепломассообменных процессов в газожидкостных реакторах.

Выводы. Для тестирования, совершенствования и практического использования полученных результатов необходима организация обмена актуальными данными измерительных приборов автоматической системы управления технологическими процессами реального объекта с предложенной компьютерной системой.

Ключевые слова: газожидкостный реактор, уравнение движения, межфазная поверхность, теплообмен, массообмен, математическая модель движения пузырьков газа

Vladimir Pavlovich Zhukov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Anton Nikolaevich Belyakov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Head of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: ab_pm@mail.ru

Sergei Dmitrievich Gorshenin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-34, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Sergey Andreevich Smirnov

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45

Modeling the oscillatory motion of a gas bubble in a liquid layer

Abstract

Background. Thermal and chemical processes in gas-liquid reactors often involve complex nature of the movement of components, which largely determines the process time, the contact area of the phases and, consequently, the efficiency and speed of thermal and chemical processes in processing installations. Special attention should be paid to the fluctuation in the velocity of gas bubbles in gas-liquid reactors observed in experiments, which significantly affect the efficiency and duration of the analyzed processes. In this regard, the development of models of the movement of gas bubbles in a liquid layer, taking into account velocity fluctuations is an urgent task from the point of view of improving the analyzed processes.

Materials and methods. The formulation and solution of the problem of dynamics of oscillatory motion are based on differential equations of bubbles motion and methods for their solution.

Results. A model of the movement of gas bubbles in a liquid layer has been developed, in which a vapor bubble is represented by a set of two subsystems, one of which performs translational motion, and the other – oscillatory motion. As a result of solving the differential equations of motion of subsystems, the dependences of the velocity of gas bubbles on time in the reactor core have been obtained and studied. Based on the obtained solutions, recommendations have been developed to improve the efficiency of heat and mass transfer processes in gas-liquid reactors.

Conclusions. To test, improve and practically use the obtained results, it is necessary to organize the exchange of up-to-date data of measuring devices of the automated control system of a real object with the proposed computer system.

Key words: gas-liquid reactor, equation of motion, interfacial surface, heat exchange, mass transfer, mathematical model of gas bubble motion

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.079-085

Введение. Анализ процессов совместного движения потоков газа и жидкости в технологическом оборудовании привлекает внимание исследователей как с научной [1–3], так и с практической [4–7] точки зрения. Это связано в первую очередь с реализацией этих процессов как в различных энергетических установках, так и в оборудовании смежных отраслей промышленности. Исследования данных процессов во многом сдерживаются сложным характером совместного движения фаз: движением пузырьков газа в жидкости. Возможный фазовый переход в потоках теплоносителей, обусловленный испарением жидкости или конденсацией пара, существенно усложняет описание движения компонентов. В первую очередь это связано с тем, что фазовый переход существенным образом (на два–три порядка) изменяет объем теплоносителей, следовательно, скорости их движения и

время пребывания компонентов в активной зоне реактора. Для обеспечения эффективного управления процессом и для оптимизации режимов работы технологических систем исследование совместного движения многофазных сред является, безусловно, актуальной задачей.

Одним из наиболее типичных примеров совместного движения многофазных потоков в энергетических установках является процесс всплытия пузырьков пара или газа в слое жидкости. Данный процесс реализуется в экранных трубах и барабанах паровых котлов, в барботажных ступенях деаэраторов и смешивающих подогревателях. Вопросам аналитического и численного моделирования свободного всплытия пузырьков газа посвящены многочисленные исследования отечественных и зарубежных авторов [1, 2, 8, 9]. Следует отметить, что при всплытии пузырьков малого диаметра сохраняется их

сферическая форма, в то время как большие пузырьки могут приобретать эллипсоидальную или более сложную форму. По мере того как пузырек деформируется, начинает появляться неустойчивость, выражающаяся в зигзагообразной или спиралеобразной траектории движения пузырька. В области построения численных методов описания движения пузырьков достигнуты существенные успехи, что позволяет моделировать определенный класс таких течений. Однако до сих пор универсальной вычислительной методологии моделирования не выработано. Это во многом связано с различными методиками проведения экспериментальных исследований и с определением границ применения допущений, используемых при теоретических выводах.

Следует отметить, что численные методы часто требуют определенного программного обеспечения, к которому в последнее время доступ ограничен. В связи с этим задачи построения отечественных моделей и разработки доступных программных средств приобретают особую актуальность. Важно отметить, что сложность описания и численного решения представленных моделей должна обеспечивать получение решения с заданной точностью за приемлемое время.

Наряду с задачами прямого расчета технологических систем особую актуальность в последнее время приобретает обратные задачи диагностики [10], позволяющие оперативно определять отклонения в работе оборудования от номинальных режимов.

Методы исследования. Для разработки, описания и диагностики анализируемой системы предлагается в качестве рабочего инструмента использовать постановку и решение прямых и обратных задач диагностики [10]. Под прямыми задачами в общем случае понимаются задачи, для которых заданы причины, а искомыми величинами являются следствия. Обратными будут задачи, в которых известны следствия, а неизвестными выступают причины. Под прямыми задачами динамики движения пузырьков в нашем случае понимается определение скорости движения и времени всплытия этих пузырьков в слое жидкости, а под обратными задачами – определение параметров модели или диагностика возможных неисправностей системы при заданных параметрах теплоносителей на входе и выходе. Следует отметить, что набор заданных параметров для каждой конкретной установки может различаться, что обуславливает возможные вариации в постановке обратной задачи.

Результаты исследования. Целью настоящего исследования является описание в одномерной постановке прямой и обратной задач колебательного движения пузырька газа при всплытии в неподвижном слое жидкости применительно к энергетическим теплообменным аппаратам. Для достижения цели предполагается решение следующих задач:

1. Выбор системы моделирования в виде пузырька газа и представление этого пузырька совокупностью двух подсистем: одна из которых совершает колебательное движение, обусловленное поверхностными натяжениями оболочки и возможным изменением формы пузырька при всплытии; другая подсистема совершает поступательное движение, характерное для пузырьков правильной формы.

2. Построение моделей скоростей движения для двух выбранных подсистем и вычисление скорости системы через скорости ее подсистем.

3. Разработка алгоритма и программного модуля для решения прямой задачи динамики движения пузырька в слое жидкости. Идентификация и верификация модели посредством сравнения результатов расчета с данными других авторов и данными экспериментальных исследований.

4. Формулировка обратной задачи диагностики состояния системы по известным динамическим характеристикам ее подсистем.

Объект исследования и алгоритм его представления в виде двух подсистем с указанием действующих на подсистемы сил показан на рис. 1. Моделируемый пузырек газа (а) представляется в виде двух подсистем (б): подсистемой массой m_1 , совершающей колебательное движение (в), и подсистемой массой m_2 , совершающей поступательное движение (г).

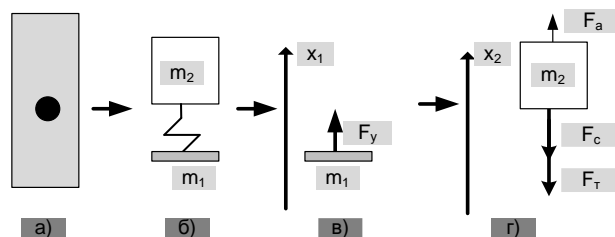


Рис. 1. Схема системы моделирования пузырька

Модель предлагаемой системы представлена совокупностью двух моделей ее подсистем: модель подсистемы, совершающей колебательное движение массой m_1 (первый пузырек), и модель подсистемы, совершающей поступательное движение массой m_2 (второй пузырек).

При построении модели движения для первой колебательной подсистемы считается, что тело массой m_1 находится в положении равновесия, а отклонение от этого положения равновесия сопровождается возникновением силы упругости, которая обуславливается деформацией оболочки и которая стремится вернуть этот пузырек в положение равновесия:

$$F_y = -k_1 x_1.$$

Физическая природа силы упругости обуславливается деформацией оболочки пузырька при движении. В первом приближении при построении модели считается, что сила упругости

линейно зависит от смещения из положения равновесия и определяется деформацией оболочки пузырька при движении. При этом сам механизм деформации и изменение формы пузырька подробно не рассматривается, а описывается интегральной линейной силой упругости. Для описания одномерного движения подсистемы первого пузырька выбрана вертикальная ось координат x_1 , направление которой показано на рис. 1. На пузырек действует сила упругости, направленная к положению равновесия или к точке, в которой сила упругости равна нулю. Движение подсистемы в этом случае описывается дифференциальным уравнением вида [11]

$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} = -\frac{k_1 x_1}{m_1}, \quad (1)$$

где x_1 – координата первого пузырька; t – время процесса; m_1 – масса пузырька; k_1 – коэффициент эффективной жесткости, которая определяется упругостью оболочки пузырька.

Решение (1) записывается в виде [11]

$$x_1 = A_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

где $\omega = \sqrt{k_1 / m_1}$ – частота колебаний; A_0 , φ – амплитуда колебаний и начальная фаза, которые определяются из начальных условий $t = 0$, $x = x_0$, $v = v_0$:

$$A_0 = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}};$$

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{\omega x_0}{v_0}.$$

Скорость первого пузырька выражается через первую производную координаты по времени:

$$v_1 = \frac{dx_1}{dt} = A_0 \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi). \quad (3)$$

При описании динамики второй подсистемы, участвующей в поступательном движении, считается, что на тело действуют сила Архимеда, сила сопротивления и сила тяжести. Сила Архимеда (F_A), равная весу вытесненной жидкости, записывается в виде

$$F_A = V_2 \rho_{\text{ж}} g,$$

где V_2 – объем пузырька; g – ускорение свободного падения; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости.

Линейная сила сопротивления (F_C), действующая на пузырек со стороны жидкости, направленная в противоположную сторону от направления движения, представляется в виде [12]

$$F_C = -S k_2 v_2,$$

где v_2 – скорость пузырька; S – поперечное сечение пузырька; k_2 – коэффициент сопротивления.

Сила тяжести (F_T) в выбранной системе координат описывается следующим образом:

$$F_T = -g m_2.$$

Уравнение второго закона Ньютона после его деления на массу записывается в виде

$$\frac{d^2 x_2}{dt^2} = \frac{F_A}{m_2} - \frac{F_C}{m_2} - g, \quad (4)$$

где x_2 – координата второй подсистемы, или пузырька массой m_2 .

Уравнение (4) после замены второй производной координаты по времени на первую производную скорости по времени преобразуется к виду

$$\frac{dv_2}{dt} = a - b v_2, \quad (5)$$

где постоянные коэффициенты a и b вычисляются по выражениям:

$$a = \frac{\rho_{\text{ж}} g}{\rho_r} - g;$$

$$b = \frac{k_2 S}{m_2},$$

где ρ_r – плотность газа.

Решение уравнения (5) при начальных условиях

$$v_2|_{t=0} = v_{20}$$

записывается в виде

$$v_2(t) = \frac{a}{b} - \left(\frac{a}{b} - v_{20} \right) \exp(-b t). \quad (6)$$

Зная скорость движения и массу каждой подсистемы, скорость системы находится с учетом скорости движения первой подсистемы относительно второй подсистемы по формуле [13]

$$v = \frac{(v_1 + v_2) m_1 + v_2 m_2}{m_1 + m_2}. \quad (7)$$

Координата центра масс системы определяется по известным координатам подсистем [13]:

$$x = \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2}{m_1 + m_2}. \quad (8)$$

На основании разработанной математической модели движения (3), (6)–(8) для расчета скорости и координаты пузырька в слое жидкости предложен специальный алгоритм (рис. 2). Представленный алгоритм реализован в программном пакете на языке Matlab. Расчетный пример по предложенной модели скорости движения пузырька выполнен для следующих исходных данных: плотность жидкости $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$; плотность пара $\rho_r = 1 \text{ кг/м}^3$; ускорение свободного падения $g = 10 \text{ м/с}^2$.

Ввод исходных данных
Расчет скорости колебательного движения (3)
Расчет скорости поступательного движения (6)
Расчет скорости (7) и координаты (8) пузырька
Вывод результатов расчета

Рис. 2. Алгоритм расчета скорости движения и координаты пузырька в слое жидкости

Результаты расчетных исследований, проведенных согласно представленному на рис. 2 алгоритму, приведены на рис. 3 в виде зависимости скорости движения пузырька при всплытии от времени.

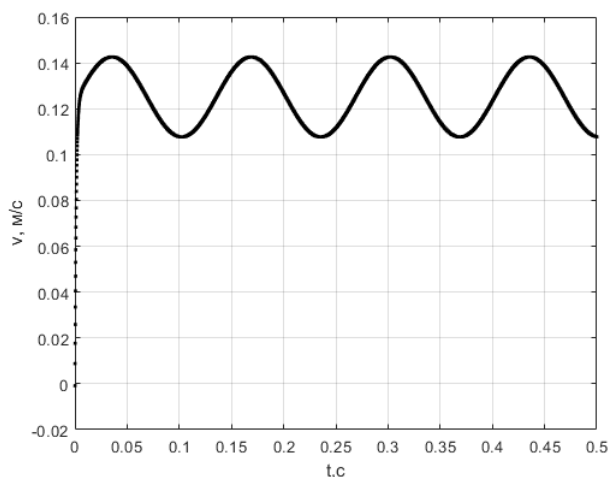


Рис. 3. Расчетная зависимость скорости движения пузырька при всплытии от времени

Анализ полученных результатов (рис. 3) показывает, что разработанная модель позволяет описывать колебание скорости пузырька в слое жидкости. Следует отметить, что предложенная модель позволила определить частоту колебания скорости пузырька, которая совпала с опубликованными результатами других авторов [1], что является подтверждением правильности заложенных в представленную модель допущений.

Для демонстрации прогностических возможностей разработанной модели на рис. 4, 5 представлены результаты расчетных исследований.

На рис. 4 представлена расчетная зависимость максимальной скорости движения пузырька 1 и амплитуды колебания его скорости 2 от соотношения масс пузырьков рассматриваемых подсистем. Следует отметить, что увеличение массы пузырька, согласно полученным результатам, приводит к увеличению скорости пу-

зырька при всплытии, что согласуется с многочисленными данными экспериментальных исследований, приведенными на рис. 6. При этом найденная по результатам расчетов амплитуда колебания скорости с ростом массы пузырька уменьшается.

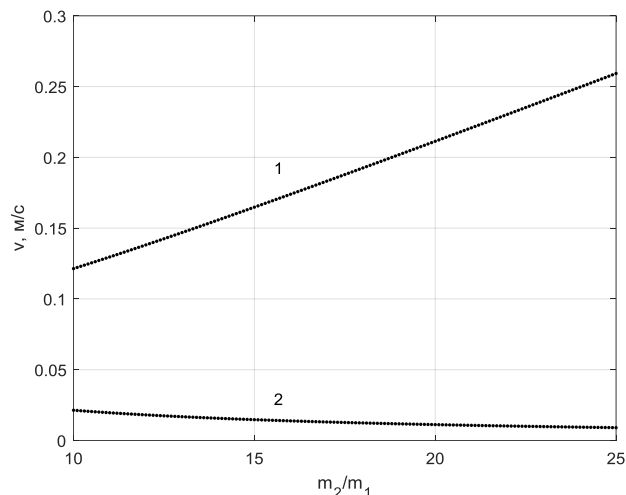


Рис. 4. Расчетные зависимости максимальной скорости движения (1) и амплитуды колебания скорости A_0 (2) пузырька от соотношения масс пузырьков рассматриваемых подсистем

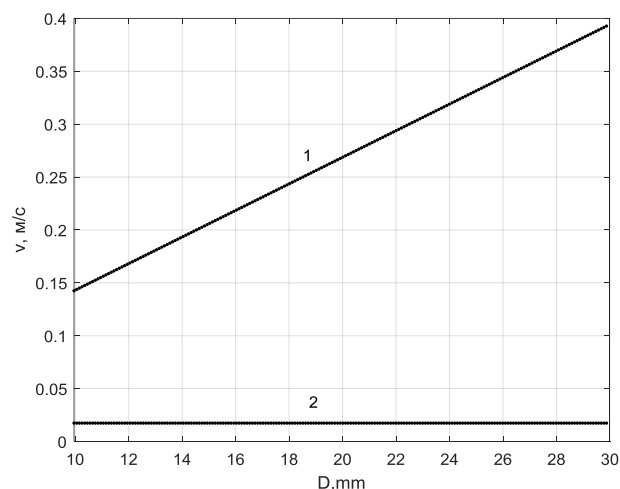


Рис. 5. Расчетная зависимость максимальной скорости движения пузырька (1) и амплитуды колебания скорости A_0 (2) от диаметра пузырька

На рис. 5 представлена расчетная зависимость максимальной скорости движения пузырька 1 и амплитуды колебания скорости 2 от диаметра пузырька. Следует отметить, что увеличение размера пузырька также приводит к увеличению скорости всплытия, однако амплитуда колебания скорости, в отличие результатов, приведенных на рис. 4, практически не меняется.

Идентификация и верификация модели проведены косвенно, посредством сравнения полученных результатов с результатами экспериментальных данных, представленными на

рис. 6. Результаты экспериментальных исследований по определению зависимости установившейся скорости всплытия пузырьков от их размера получены разными авторами [8, 9]. Анализ приведенных данных свидетельствует о существенном разбросе результатов и, следовательно, о наличии возможных неучтенных факторов при проведении экспериментов. Следует отметить, что рассчитанные значения, полученные в рамках предложенной одномерной модели (3)–(7), находятся в интервале варьирования приведенных экспериментальных данных, что является подтверждением адекватного описания моделью экспериментальных результатов, а также свидетельствует о необходимости дальнейшего проведения расчетных и экспериментальных исследований с уточнением факторов и условий проведения испытаний.

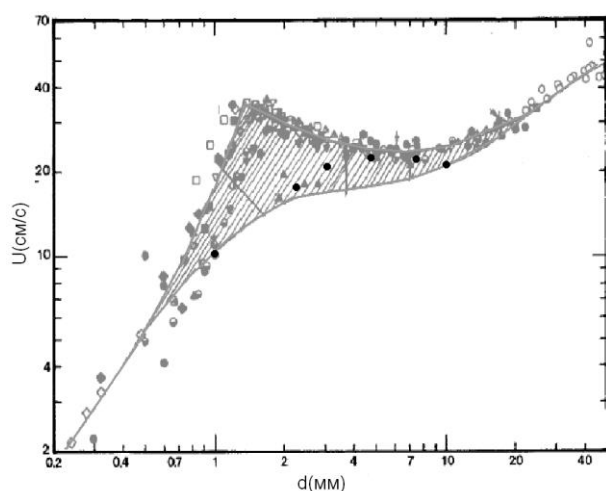


Рис. 6. Результаты экспериментальных исследований по определению установившейся скорости всплытия пузырьков в зависимости от размера пузырьков [8, 9]

Найденное решение прямой задачи колебательного движения пузырька в слое жидкости позволяет перейти к постановке и решению обратной задачи диагностики состояния теплообменных систем с двухфазным течением потоков. В данном случае предлагается в качестве диагностического признака использовать частоту колебаний скорости пузырька. При этом причины отклонения значений частоты от нормативных планируется диагностировать с использованием представленного математического описания.

Выводы. Разработанная одномерная математическая модель движения пузырьков газа в неподвижном слое жидкости, описывающая колебание скорости пузырька при всплытии, и полученные в результате ее решения характеристики движения пузырьков газа в реакторе позволяют управлять эффективностью основных процессов в установке.

Проведенная проверка адекватности модели показала качественно верное описание

характера движения пузырьков в рассмотренном диапазоне варьирования параметров.

Для тестирования, совершенствования и практического использования полученных результатов необходима организация обмена актуальными данными измерительных приборов автоматической системы управления технологическими процессами (АСУТП) реального объекта с предложенной компьютерной системой.

Предложенный подход к решению прямой задачи описания колебательного движения пузырька в слое жидкости позволяет ставить и решать обратные задачи диагностики состояния теплообменных систем с двухфазными потоками.

Список литературы

1. **Численное** моделирование свободного всплытия пузырька воздуха/ А.С. Козелков, А.А. Куркин, В.В. Курулин и др. // Изв. РАН. МЖГ. – 2016. – № 6. – С. 3–14.
2. **Архипов В.А., Васенин И.М., Усанина А.С.** Экспериментальное исследование нестационарных режимов всплытия одиночного пузырька // Инж.-физ. журн. – 2013. – Т. 86, № 5. – С. 1097–1106.
3. **Жуков В.П., Барочкин Е.В.** Системный анализ энергетических теплообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
4. **Справочник по теплообменникам:** в 2 т. Т. 1: пер. с англ. / под ред. О.Г. Мартыненко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.
5. **Исаченко В.П.** Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.
6. **Рыжкин В.Я.** Тепловые электрические станции. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.
7. **Калатузов В.А., Павлов В.А.** Расчет ограничений электрической мощности ТЭЦ, связанного с работой систем циркуляционного водоснабжения // Электрические станции. – 1987. – № 4. – С. 18–22.
8. **Talaia M.A.R.** Terminal velocity of a bubble rise in a liquid column // International Journal of Mathematical, Computational, Physical and Quantum Engineering. – 2007. – Vol. 1, No. 4.
9. **Clift R., Grace J.R., Weber M.E.** Bubbles, drops and particles. – 1 ed. – London: Academic Press, 1978.
10. **Самарский А.А., Вабищевич П.Н.** Численные методы решения обратных задач математической физики. – М.: Изд-во ЛКИ, 2009. – 480 с.
11. **Лойцянский Л.Г., Лурье А.И.** Курс теоретической механики. Т. 2. – М.: Наука, 1983. – 640 с.
12. **Процессы и аппараты химической технологии.** Т. 2. Механические и гидромеханические процессы / под ред. А.М. Кутепова. – М.: Логос, 2001. – 600 с.
13. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. – М.: Высш. шк., 2006. – 575 с.

References

1. Kozelkov, A.S., Kurkin, A.A., Kurulin, V.V., Lashkin, S.V., Tarasova, N.V., Tyatyushkina, E.S. Chislennoe modelirovanie svobodnogo vsplytiya puzyr'ka vozdukh [Numerical modeling of free ascent of an air bubble]. *Izvestiya RAN. MZhG*, 2016, no. 6, pp. 3–14.
2. Arkhipov, V.A., Vasenin, I.M., Usanina, A.S. Experimental'noe issledovanie nestatsionarnykh rezhimov

vsplytiya odinochnogo puzyr'ka [Experimental investigation of unsteady modes of ascent of a single bubble]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2013, vol. 86, no. 5, pp. 1097–1106.

3. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennyykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.

4. Martynenko, O.G. (ed.) *Spravochnik po teploobmennikam v 2 t., t. 1* [Handbook of heat exchangers: in 2 vols., vol. 1]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 560 p.

5. Isachenko, V.P. *Teploobmen pri kondensatsii* [Heat exchange during condensation]. Moscow: Energiya, 1977. 240 p.

6. Ryzhkin, V.Ya. *Teplovye elektricheskie stantsii* [Thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 328 p.

7. Kalatuzov, V.A., Pavlov, V.A. Raschet ogranicheniy elektricheskoy moshchnosti TETs, svyazannogo s rabotoy sistem tsirkulyatsionnogo vodosnabzheniya [Calculation of the limitations of the electric power of the CHP plant associated with the operation of circulating

water supply systems]. *Elektricheskie stantsii*, 1987, no. 4, pp. 18–22.

8. Talaia, M.A.R. Terminal velocity of a bubble rise in a liquid column. *International Journal of Mathematical, Computational, Physical and Quantum Engineering*, 2007, vol. 1, no. 4.

9. Clift, R., Grace, J.R., Weber, M.E. Bubbles, drops and particles. London: Academic Press, 1978.

10. Samarskiy, A.A., Vabishchevich, P.N. *Chislennyye metody resheniya obratnykh zadach matematicheskoy fiziki* [Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics]. Moscow: Izdatel'stvo LKI, 2009. 480 p.

11. Loytsyanskiy, L.G., Lur'e, A.I. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki. T. 2* [Course of theoretical mechanics. Vol. 2]. Moscow: Nauka, 1983. 640 p.

12. Kutepov, A.M. (ed.) *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. T. 2. Mekhanicheskie i gidromekhanicheskie protsessy* [Processes and apparatuses of chemical technology. Vol. 2. Mechanical and hydromechanical processes]. Moscow: Logos, 2001. 600 p.

13. Venttsel', E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow: Vysshaya shkola, 2006. 575 p.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.42

Евгений Рафаилович Пантелеев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры программного обеспечения компьютерных систем, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-98-60, e-mail: panteleev@gapps.ispu.ru

Синтез вопросов контроля результатов обучения методом инверсии аксиом модели предметных знаний

Авторское резюме

Состояние вопроса. Разработка тестов контроля результатов обучения требует создания контрольных вопросов. Количество этих вопросов должно быть достаточным для достоверной оценки знаний, а их содержание – целостно отражать знания в предметной области контроля. В настоящее время используются методы автоматической генерации вопросов, основанные на использовании моделей машинного обучения и рациональных моделей представления знаний. Их применение полностью снимает количественную составляющую проблемы. Однако модели машинного обучения не гарантируют целостного представления знаний, а рациональные модели, хотя и обеспечивают целостность, не решают проблему генерации вопросов, контролирующих понимание простейших правил, которые необходимы для получения заданного результата. Цель исследования заключается в решении этой проблемы.

Материалы и методы. Рациональная модель предметных знаний представлена в стандарте языка онтологий web. Данный выбор обоснован глобальной распространенностью стандарта, наличием доступной документации и поддержкой свободно распространяемыми приложениями, в частности редактором онтологий Protégé и средой программирования SWI Prolog, декларативная модель представления знаний которой совместима с моделью онтологий web.

Результаты. Предложен метод синтеза вопросов контроля по онтологической модели предметных знаний, представляющий собой инверсию аксиом вида «если свойства сущности удовлетворяют ограничениям OWL-класса, она принадлежит этому классу», результатом которой является вопрос вида «каким ограничениям должны удовлетворять свойства сущности, если она принадлежит OWL-классу?». Инверсия является особенностью метода, который, в отличие от известных, генерирующих вопросы на понимание следствий известных причин, выполняет синтез вопросов на понимание причин, вызвавших заданное следствие. Достоверность результатов подтверждена их сопоставлением с парами «аксиома–следствие» онтологической модели.

Выводы. Метод обеспечивает контроль понимания правил, необходимых для получения заданного решения с помощью аксиом OWL-классов. Он был использован для разработки тестов по дисциплинам инженерной подготовки. Использование стандартного формата представления знаний позволяет применять метод для разработки вопросов контроля в других предметных областях.

Ключевые слова: компьютерный контроль знаний, автоматическая генерация вопросов, онтология предметной области, аксиомы вывода, инверсия

Evgeny Raphailivich Panteleev

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Computer Systems Software Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-98-60, e-mail: panteleev@gapps.ispu.ru

Synthesis of control questions on learning outcomes using the axiom inversion method of subject knowledge model

Abstract

Background. Development of control tests of learning outcomes requires creation of test question. The number of these questions should be sufficient for reliable knowledge assessment, and their content should comprehensively reflect knowledge in the subject area of control. Currently, methods of automatic question generation based on machine learning models and rational models of knowledge representation are used. Their application completely removes the quantitative component of the problem. However, machine learning models do not guarantee a holistic representation of knowledge, and rational ones, although they provide integrity, do not solve the problem of generating questions that control understanding of the simple rules necessary to obtain a given result. The purpose of the study is to solve this problem.

Materials and methods. The rational model of subject knowledge is presented according to the web ontology language standard. This choice is justified due to wide use of the standard, the availability of accessible documentation and freely distributed applications, in particular, the Protégé ontology editor and the SWI Prolog programming environment, which declarative knowledge representation model is compatible with the web ontology model.

Results. A method for synthesizing control questions based on a model of subject knowledge has been developed. Synthesis is performed by inversion of axioms of the following form: "if the properties of an entity satisfy the constraints of an OWL class, it belongs to this class." The result of the inversion is a question of the following form: "what constraints should the properties of an entity satisfy if it belongs to an OWL class?" Inversion is a feature of the method, which, unlike the known ones that generate questions for understanding the consequences of known causes, synthesizes questions for understanding the causes of a given consequence. The validity of results is confirmed by their comparison with the "axiom-consequence" pairs of the ontological model.

Conclusions. The method ensures control of understanding of the rules necessary to obtain a given solution using the axioms of OWL classes. It has been used to develop tests for engineering training courses. The use of a standard format for knowledge representation allows the method to be used for developing control questions in other subject domains.

Key words: computerized knowledge control, automatic question generation, subject domains ontology, inference axioms, inversion

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.086-093

Введение. Эффективная организация процесса обучения невозможна без использования процедур контроля результатов, которые играют роль обратной связи, используемой для перераспределения ресурсов обучения в функции отклонения измеренных результатов от целевых (эталонных). Этот факт определяет широкое разнообразие форм контроля, которые должны использоваться согласованно и в соответствии с принципом методической целесообразности. Он определяет для каждой из форм нишу предпочтительного применения (фазу процесса обучения, таксономический уровень результатов), в пределах которой эффект от использования данной формы контроля превосходит связанные с ее применением издержки. В соответствии с этим принципом, компьютерные формы контроля результатов обучения целесообразно использовать в качестве инструментов входного или промежуточного контроля знаний (способности воспроизводить и классифицировать материал) и умений (способности применять простейшие правила для получения результата). В этой нише преимущества использования компьютерного контроля (объективность результатов, возможность встраивания в корпоративные системы управления, глобальная доступность) существенно превосходят затраты на раз-

работку заданий контроля. Автоматизация разработки заданий преследует цель дальнейшего уменьшения затратной составляющей. Одновременно она может способствовать повышению эффективности результатов в том случае, когда «прозрачная» процедура генерации задания применяется к целостной и непротиворечивой модели предметных знаний. Ценность автоматизации тем выше, чем больше уровней таксономии результатов обучения (таксономии Блума) покрывают синтезированные задания. Таким образом, при анализе состояния вопроса в области автоматизации разработки заданий контроля целесообразно позиционировать известные разработки в пространстве критериев «тематическая полнота заданий – целостность и непротиворечивость модели знаний – количество уровней оцениваемых результатов».

Методам автоматизации разработки контрольных заданий и моделям предметных знаний, на которых они базируются, посвящено большое количество опубликованных работ, что свидетельствует об актуальности данного направления исследований. В этих публикациях можно выделить обзорные исследования [1–3], тематические разработки [4–10] и исследования смежных вопросов, например адаптивной генерации вопросов для целевых групп пользовате-

лей [11]. Чтобы сформировать общее представление о возможностях различных групп методов, начнем с анализа обзорных статей. При этом будем исходить из того, что все множество используемых этими методами моделей представления знаний можно подразделить на подмножество рациональных моделей, имеющих формальную структуру и определенные на ней аксиомы вывода, и подмножество моделей машинного обучения.

В [1] содержится анализ методов генерации контрольных заданий (вопросов) на базе онтологий, представляющих подкласс рациональных моделей представления знаний. Согласно [12], онтология — это формальная спецификация разделяемой концептуальной модели представления знаний. Здесь онтология определена как формальная спецификация концептуальной модели, т. е. явное и однозначное описание системы существенных понятий предметной области. Атрибут «разделяемая» характеризует эту модель как имеющую согласованное понимание внутри профессионального сообщества. Как отмечают авторы [1], такое позиционирование онтологий позволяет предположить, что именно эта модель явного представления знаний является предпочтительной базой для генерации объективных заданий контроля. Ее использование создает предпосылки для построения заданий, удовлетворяющих критериям тематической полноты и целостности. Что касается третьего критерия, то использование онтологий в принципе позволяет строить задания как на «воспроизведение», так и на «понимание», однако приведенные в [1] примеры ограничены интерпретацией отношений «элемент — класс», «класс — подкласс», «свойство — (под)свойство» и не предполагают использования более мощных правил, определяющих новый класс через уже существующие.

В отличие от [1], в [2, 3] обсуждается построение заданий контроля с использованием методов NLP (Natural Language Processing) и моделей машинного обучения на базе наборов априори слабо структурированных текстовых и мультимедийных данных. Необходимость реконструкции формальной структуры по документу, полнота, целостность и непротиворечивость которого могут вызывать сомнения, ставит эту группу методов в неконкурентную позицию по отношению к методам, построенным на использовании онтологий. Кроме того, вопросы, которые генерируют подобные модели, способны оценивать только результаты низшего таксономического уровня — знания.

Оценки с позиций этих предварительных выводов результаты конкретных исследований и разработок в области синтеза заданий компьютерного контроля.

Изложенный в [4] подход к генерации контрольных вопросов базируется на использовании моделей машинного обучения, следова-

тельно, не гарантирует выполнения критериев полноты, целостности и непротиворечивости представления знаний. Кроме того, синтезированные вопросы предполагают оценку знаний на уровне известных фактов.

Подход, описанный в [5], базируется на онтологической модели знаний, что создает предпосылки для выполнения критериев полноты, целостности и непротиворечивости. Данный подход позволяет интерпретировать правила для построения вопросов, которые, следовательно, могут оценивать умение применять эти правила. Например, если правило определяет инженера как специалиста, который имеет диплом, выданный инженерным вузом, то построенный в результате интерпретации этого правила вопрос может выглядеть так: «Кем является специалист с дипломом инженерного вуза?». Таким образом, вопрос оценивает умение применять правила в прямом направлении — от заданного набора причин к их следствиям. Однако в рамках данного подхода невозможно построение вопросов на понимание причин, вызвавших то или иное следствие, т. е. на интерпретацию правил в обратном направлении, например: «Какие предусловия необходимы для получения статуса инженера?». Следовательно, покрытие таксономического уровня умений путем интерпретации правил онтологии в рамках данного подхода нельзя считать полным.

В [6] также используется онтологическая модель представления знаний. Предложенный подход использует ограниченное подмножество аксиом вывода «класс—подкласс», «свойство—(под)свойство» для проверки умений применять эти аксиомы. Аксиомы, определяющие новые классы в терминах существующих через ограничения на значения свойств элементов, в рамках данного подхода не интерпретируются.

Рассматриваемый в [7] метод генерации тестовых заданий базируется на продукционной модели. Продукционные модели, как и онтологии, — это подкласс рациональных моделей представления знаний, однако, в отличие от онтологий, концептуальная целостность которых обеспечивается методологией построения «от общего к частному», продукционные модели строятся в противоположном направлении, вследствие чего подвержены трудно выявляемым ошибкам. Теоретически продукционные модели универсальны, что в рамках обсуждаемой работы подтверждается генерацией вопросов контроля фактических знаний и умений применять правила. Однако применение правил здесь контролируется на уровне результата, а не способ его получения.

В [8] в качестве информационной основы метода генерации контрольных вопросов рассматривается реляционная модель, которая не обладает семантикой, т. е. не является моделью представления знаний, поэтому полнота и

целостность такой модели не гарантированы. Кроме того, возможности генерации ограничены порождением вопросов контроля фактических знаний.

В [9] генератор вопросов контроля построен на онтологической модели OSTIS (Open Semantic Technology for Intelligent Systems: Открытые семантические технологии для проектирования интеллектуальных систем), разработанной инженерами и учеными из Беларуси. Однако представленные возможности генератора ограничены уровнем контроля фактических знаний.

В [10] представлен автоматический генератор тестов на базе онтологической модели предметных знаний консорциума web, однако авторы представляют возможности этого генератора только на уровне построения вопросов контроля фактических знаний.

Подводя итоги анализа существующей литературы, можно сделать следующие выводы:

1) преимущество методов генерации контрольных вопросов, основанных на использовании рациональных моделей представления знаний, перед используемыми для этой же цели методами машинного обучения состоит в том, что они создают предпосылки для обеспечения полноты, целостности и непротиворечивости корпуса контрольных вопросов;

2) среди рациональных моделей предпочтительной является модель, представленная на языке онтологий web, который считается глобально признанным стандартом, исчерпывающе документирован и имеет свободно распространяемые программные средства его интерпретации;

3) синтезированные вопросы охватывают два нижних уровня таксономии результатов обучения – уровень знаний и уровень способностей применять правила, причем в известных реализациях речь идет о контроле умений применять правила только в прямом направлении – от причин к следствиям.

В связи с этим целью настоящего исследования является решение проблемы генерации вопросов, контролирующих понимание правил, которые необходимы для получения заданного результата, путем разработки метода инверсии аксиом OWL-классов.

Методы исследования. Обоснованный выше выбор модели представления знаний для решения задачи синтеза контрольных вопросов требует описания существенных для решения этой задачи свойств модели. Онтологическая модель консорциума W3C построена с использованием стека стандартов, определяющих единый синтаксис и совместно используемую семантику языка описания моделей, благодаря использованию общих словарей. Стандарты поддерживают

реляционный синтаксис записи отношений в виде троек RDF «субъект–предикат (свойство)–объект» и семантику, которая обеспечивает уникальность элементов модели по принципу «один элемент–один глобально уникальный адрес» (ссылочная семантика) и стандартные правила вывода следствий из аксиом модели (семантика вывода). Именно семантика вывода является существенным с точки зрения решаемой задачи качеством модели. Она базируется на использовании понятия класса как абстрактного множества сущностей и отношений, в которых фигурирует это понятие. Одно из таких отношений – это отношение «подкласс»: `subClassOf`. Связанная с ним аксиома вывода гласит: сущность, принадлежащая подклассу, принадлежит также и родительскому классу. Второй тип отношения – это отношение эквивалентности определяемого класса анонимному классу, для которого заданы ограничения на значения свойств принадлежащих ему сущностей. Например, по классификации МАГАТЭ¹, класс реакторов GCR (gas-cooled reactor) может быть определен как множество реакторов, теплоносителем в которых является газообразный агент, а замедлителем – графит. Интерпретация данного определения в редакторе онтологий Protégé и построенные в результате его интерпретации в контексте заданных значений свойства сущностей класса «Реакторы» следствия показаны на рис. 1. Построенный на основе этого определения «прямой» вопрос может выглядеть так: «Какие реакторы относятся к классу GCR?», а «инверсный» вопрос – «Почему реактор Magnox относится к классу GCR?»

Редактор Protégé сохраняет онтологию (по желанию пользователя – вместе с результатами вывода) в одном из стандартных текстовых форматов (XML, TTL и т.п.). Фрагмент формата TTL, содержащий определение сущности Magnox с учетом заданных (asserted) и выведенных (inferred) значений свойств, имеет следующий вид:

```
:Magnox rdf:type
owl:NamedIndividual,
    :GCR,
    :IAEA_classes,
    :reactor;
    :heat_carrier :CO2;
    :moderator :C;
    rdfs:label "Magnox".
```

К заданным относятся, например, свойства, определяющие принадлежность сущности к классам «Реакторы» и «Классификация МАГАТЭ», а также тип теплоносителя (углекислый газ) и замедлителя (графит). К выведенным свойствам относятся принадлежность к классу GCR.

¹ <https://pris.iaea.org/PRIS/Glossary.aspx> Глоссарий терминов, используемых в базе данных PRIS. Дата обращения: 13 ноября 2016.

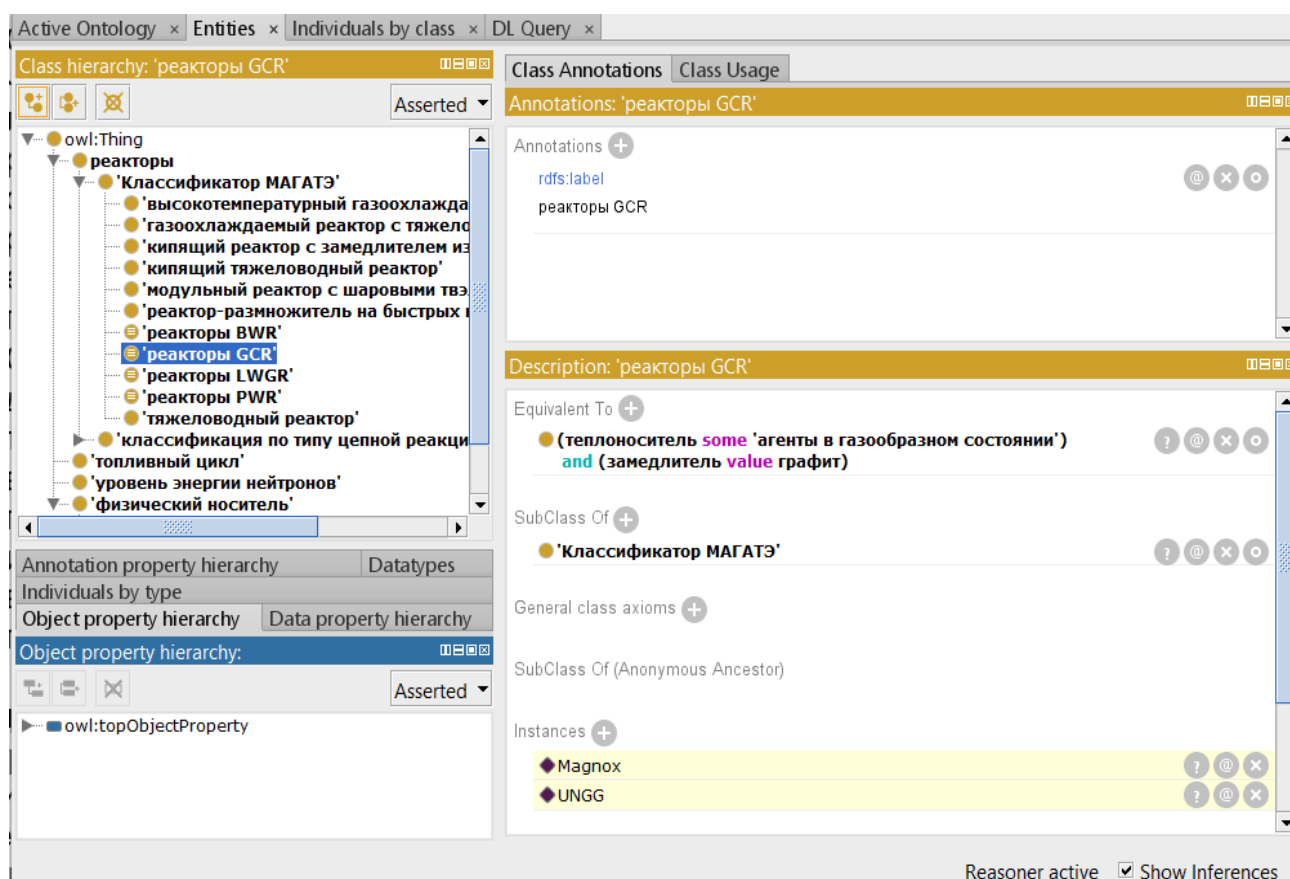


Рис. 1. Запись и интерпретация определений ограниченного класса в редакторе Protégé

Программной средой реализации обсуждаемого ниже метода инверсии выбран язык Пролог, точнее, его версия SWI Prolog². В качестве обоснования выбора можно указать на следующие факторы. Во-первых, Пролог – это декларативный язык отношений, т. е. реляционный язык, и сопряжение двух реляционных моделей будет более естественным и лаконичным, чем, например, интерпретация онтологической модели процедурным языком Python. Например, в результате импорта онтологии в программу на Прологе тройки «субъект–предикат–объект» становятся частью этой программы – обычными утверждениями Пролога в формате фактов – и как таковые могут непосредственно использоваться при построении утверждений формата правил и при выполнении запросов. Во-вторых, SWI Prolog располагает набором библиотек для работы с онтологиями³ и создания интернет-приложений, скрывающих от разработчика низкоуровневые детали.

Результаты исследования. Прежде чем излагать суть метода инверсии, определим базовые отношения для записи owl-классов, используя следующие соглашения. Для обозначения именованных классов owl будем использовать курсив прописных букв латинского алфавита,

например *A*, *C*, *D*, кроме зарезервированных *B*, *P* и *V*. Сущности именованных классов будем обозначать строчным курсивом соответствующей прописной буквы, например *a* ∈ *A*. Для обозначения анонимных классов, с помощью которых определяются ограничения на значения свойств owl-классов, будем использовать курсив прописной буквы *B*, а для обозначения всего множества анонимных классов – жирный курсив ***B***. Свойства сущности обозначим курсивом прописной буквы *P*. Для обозначения области значений свойства *P* будем использовать прописной курсив *V*.

Классы owl определяются через отношения эквивалентности с анонимными классами, которые и содержат описание ограничений на значения свойств. Например, класс водо-водяных реакторов ВВР определяется как эквивалент пересечения множеств сущностей двух анонимных классов, один из которых устанавливает соответствующее ограничение на значение агента-охладителя, а второй – на значение агента-замедлителя.

В общем случае определение класса owl может быть записано следующим образом:

$$C = \left\{ \begin{array}{c} B \\ B_1 \cap B_2 | B_1 \cup B_2 | B_1 \setminus B_2 \end{array} \right. \quad (1)$$

² <https://www.swi-prolog.org/>

³ Библиотекой Owlready2 того же назначения располагает и Python.

Каждый из эквивалентных классов в (1) может быть определен через вложенные ограничения или быть терминальным. В последнем случае он непосредственно определяет множество сущностей, удовлетворяющих конкретному типу ограничения:

$$B_i^T = \{b | P_i(b)\}. \quad (2)$$

В методе инверсии используются следующие типы ограничений.

Сущность s принадлежит классу C , если хотя бы одно значение v ее свойства P принадлежит классу V :

$$\exists v \in V: v = P_i(c) \rightarrow c \in C. \quad (3)$$

Сущность s принадлежит классу C , если все значения v ее свойства P принадлежат классу V :

$$\forall v \in V: v = P_i(c) \rightarrow c \in C. \quad (4)$$

Сущность s принадлежит классу C , если значение v ее свойства P равно константе v_c из определения ограничения:

$$\exists v \in V: v = P_i(c), v = v_c \rightarrow c \in C. \quad (5)$$

Принадлежность элементов owl-классу устанавливается путем рекуррентной интерпретации (1) с учетом (2)–(5). Эту работу в редакторе Protégé выполняет компонент Reasoner. Результаты такого вывода для owl-класса CGR представлены в виде списка сущностей класса в нижней части рис. 1 и могут быть экспортированы в стандартном формате в составе онтологии для использования приложением, выполняющим синтез контрольных вопросов.

Таким образом, метод инверсного синтеза получает на входе аксиомы owl-классов (ограничения, определяющие условия принадлежности сущности классу) и следствия из этих аксиом, констатирующие принадлежность конкретных сущностей конкретным классам. Эта информация традиционно используется для построения вопросов типа «Какие сущности принадлежат owl-классу?», ориентированных от причин к следствию. Предполагается, что правильный ответ может быть получен в результате интерпретации аксиом класса в контексте значений свойств сущностей и квалифицирован как умение применять аксиомы.

Предлагаемый метод ориентирован на оценку умения реконструировать причины по заданному следствию, т. е. на синтез вопросов типа: «Почему конкретная сущность принадлежит owl-классу? Какие аксиомы класса устанавливают факт принадлежности?» или «Какие аксиомы входят в определение owl-класса?».

Компьютерный контроль, помимо построения вопроса, предполагает формальную регламентацию ответа. Открытый тип вопросов предусматривает ручной ввод ответа, тогда как закрытый – только выбор из предопределенного множества вариантов. Использование вопросов

открытого типа усложнено необходимостью регламентации синтаксиса ответа, поэтому в обсуждаемом методе принят закрытый формат одиночного/множественного выбора.

Таким образом, в рамках упомянутых выше шаблонов контрольных вопросов основная задача инверсного синтеза сводится к построению множества предопределенных вариантов ответа *Answer*, представляющего собой объединение непересекающихся подмножеств правильных ответов *True* и неправильных, но правдоподобных *False* (дистракторов):

$$Answer = True \cup False, True \cap False = \emptyset.$$

Подмножество правильных ответов *True* может быть построено на базе определения ограничений B_k того класса C_k , аксиомы которого запрашиваются в контексте вопроса об обосновании условий принадлежности сущности к C_k , или в контексте вопроса о реконструкции определения этого класса.

В качестве полного множества *Answer* метод использует объединение аксиом $\cup B_i$ для множества ограниченных классов C ($C_k \in C$), являющихся подклассами S :

$$\forall C_i \in C: C \text{ sub } S,$$

где *sub* – отношение subClassOf.

Тогда подмножество дистракторов *False* определится как разность *Answer* и *True*:

$$False = Answer \setminus True.$$

С учетом сказанного построение множества контрольных вопросов методом инверсии аксиом owl-классов может быть реализовано следующей последовательностью операций:

1. Построить множество owl-классов C для импортированной онтологии.

2. Для каждого $C_i \in C$:

2.1. Построить множества $Answer_i, True_i, False_i = Answer_i \setminus True_i$

2.2. Заполнить текстовый шаблон варианта ответа «свойство P – значение $v \in V$ »

2.3. Для каждого $c_{ik} \in C_i$:

2.3.1. Заполнить текстовый шаблон вопроса « $c_{ik} \in C_i$, так как:»

2.3.2. Экспортировать контрольный вопрос и варианты ответа на него в онтологию заданий контроля

Приведенный псевдокод генерирует вопросы на обоснование принадлежности сущности owl-классу. Псевдокод для генерации вопросов на реконструкцию свойств owl-класса выглядят как упрощение вышеприведенного заменой внутреннего цикла по сущностям класса инструкцией генерации текста вопроса в шаблоне: «Принадлежность к C_i предполагает:». Второстепенные детали процесса, такие как построение текста конкатенацией значений свойств *rdfs:label* для соответствующих элементов онтологии, в коде не рассматриваются.

Описанный метод реализован на языке SWI Prolog и обеспечивает сохранение процедуры контроля в виде множества тематически сгруппированных вопросов (признаком группировки является принадлежность вопроса к оценке конкретного owl-класса) в файле онтологии стандартного формата. Это открывает возможности для редактирования процедуры контроля любым приложением, работающим со стандартными форматами онтологий, например Protégé, а также для использования синтезированной онтологии контрольных заданий веб-сервером, который в рамках данного исследования также был реализован средствами SWI-Prolog (рис. 2).

Тема: реакторы GCR

Текущий результат: 1 вопросов, 1 правильных ответов

Вопрос: Magnox - это реакторы GCR, так как:

- ☒ теплоноситель: углекислый газ
- ☐ теплоноситель: легкая вода под давлением
- ☐ спектр нейтронов: быстрые нейтроны
- ☐ спектр нейтронов: тепловые нейтроны
- ☐ замедлитель: кипящая легкая вода
- ☐ замедлитель: легкая вода под давлением
- ☐ теплоноситель: легкая вода
- ☒ замедлитель: графит
- ☐ теплоноситель: кипящая легкая вода

Отправить

Рис. 2. Отображение контрольного вопроса в окне браузера

Выводы. Поставленная цель исследования, состоящая в обеспечении возможности контроля понимания правил, необходимых для получения заданного решения с помощью аксиом owl-классов, достигнута. Достоверность полученных результатов подтверждена разработкой тестов «Ядерные реакторы», «Алгоритмы сжатия данных» по дисциплинам инженерной подготовки ИГЭУ. Практическое использование результатов предполагает наличие навыков работы с редактором онтологий Protégé для разработки онтологий предметных знаний. Встроенные в редактор инструменты обеспечивают контроль целостности и непротиворечивости представленных в онтологии знаний.

Безусловно, освоение навыков разработки онтологий в среде редактора Protégé несколько увеличивает трудозатраты на разработку тестов. Однако следует заметить, что, во-

первых, применение «ручной» технологии предполагает, что модель предметных знаний, пусть и в неявном виде, присутствует в голове разработчика, так что речь идет лишь о затратах на формализацию этой модели. Во-вторых, эти затраты многократно перекрываются за счет автоматической генерации вопросов, которые требуют объяснения фактов, вытекающего из правил. Количество фактов, соответствующих сущностям, может на порядок превышать количество классов, которые определяют правила и которым в силу этих правил сущности принадлежат. Кроме того, одни и те же сущности можно классифицировать по нескольким основаниям. Например, помимо классификатора МАГАТЭ, ядерные реакторы можно классифицировать по виду топлива, по конструкции и по другим признакам. Это еще больше увеличивает количество автоматически генерируемых вопросов. Таким образом, затраты на формализацию ограниченного набора правил с избытком компенсируются автоматической генерацией вопросов, которые требуют объяснения многочисленных фактов, вытекающих из этих правил.

Алгоритмы, реализующие предложенный метод синтеза, обеспечивают генерацию исчерпывающего множества вопросов одиночного или множественного выбора. Стандартный формат представления результатов синтеза позволяет использовать их как в режиме ручной корректировки в редакторе Protégé, так и для их интерпретации веб-сервером, который был разработан для экспериментального подтверждения достоверности результатов данного научного исследования.

Список литературы

1. Papasalouros A., Chatzigiannakou M. Semantic Web and Question Generation: An Overview of the State of the Art // International Association for Development of the Information Society, 2018.
2. Rakangor S., Ghodasara Y.R. Literature review of automatic question generation systems // International journal of scientific and research publications. – 2015. – Vol. 5, No. 1. – P. 1–5.
3. Automatic question generation and answer assessment: a survey / B. Das, M. Majumder, S. Phadikar, A.A. Sekn // Research and Practice in Technology Enhanced Learning. – 2021. – Vol. 16, No. 1. – P. 5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s41039-021-00151-1>
4. Bišćák M., Rozinajová V. Automatic question generation based on sentence structure analysis using machine learning approach // Natural Language Engineering. – 2022. – Vol. 28, No. 4. – P. 487–517. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S1351324921000139>
5. Zoumpatianos K., Papasalouros A., Kotis K. Automated Transformation of SWRL Rules into Multiple-Choice Questions // FLAIRS. – 2011.
6. Papasalouros A., Kanaris K., Kotis K. Automatic Generation Of Multiple Choice Questions From Domain Ontologies // e-Learning. – 2008. – Vol. 1. – P. 427–434.

7. Сергушичева А.П., Швецов А.Н. Метод построения компьютерных тестирующих систем для обучения в техническом вузе // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2005. – № 10. – С. 168–180.

8. Кручинин В.В., Морозова Ю.В. Модели генераторов вопросов для компьютерного контроля знаний // Открытое и дистанционное образование. – 2004. – № 2. – С. 52–62.

9. Ли В. Онтологический подход к автоматической генерации вопросов в интеллектуальных обучающих системах // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2020. – Т. 18, № 5. – С. 44–52. DOI: <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-44-52>

10. Vinu E.V., Kumar P.S. Automated generation of assessment tests from domain ontologies // Semantic Web. – 2015. – Vol. 8, No. 6. – P. 1023–1047.

11. Le N.T. Using Semantic Web for Generating Questions: Do Different Populations Perceive Questions Differently? // Transactions on Computational Collective Intelligence XVIII. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. – P. 1–19.

12. Studer R., Benjamins R., Fensel D. Knowledge Engineering: Principles and methods // Data and knowledge engineering. – 1998. – Vol. 25. – P. 161–197.

References

1. Papasalouros, A., Chatzigiannakou, M. Semantic Web and Question Generation: An Overview of the State of the Art. International Association for Development of the Information Society, 2018.

2. Rakangor, S., Ghodasara, Y.R. Literature review of automatic question generation systems. *International journal of scientific and research publications*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 1–5.

3. Das, B., Majumder, M., Phadikar, S., Sekn, A.A. Automatic question generation and answer assessment: a survey. *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*, 2021, vol. 16, no. 1, p. 5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s41039-021-00151-1>

4. Blšták, M., Rozinajová, V. Automatic question generation based on sentence structure analysis using machine learning approach. *Natural Language Engineering*, 2022, vol. 28, no. 4, pp. 487–517. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S1351324921000139>

5. Zoumpatianos, K., Papasalouros, A., Kotis, K. Automated Transformation of SWRL Rules into Multiple-Choice Questions. *FLAIRS*, 2011.

6. Papasalouros, A., Kanaris, K., Kotis, K. Automatic Generation Of Multiple Choice Questions From Domain Ontologies. *e-Learning*, 2008, vol. 1, pp. 427–434.

7. Sergushicheva, A.P., Shvetsov, A.N. Metod postroeniya komp'yuternykh testiruyushchikh sistem dlya obucheniya v tekhnicheskoy vuzе [Method of constructing computer testing systems for training in a technical university]. *Algoritmy, metody i sistemy obrabotki dannykh*, 2005, no. 10, pp. 168–180.

8. Kruchinin, V.V., Morozova, Yu.V. Modeli generatovov voprosov dlya komp'yuternogo kontrolya znaniy [Models of question generators for computer-based knowledge control]. *Otkrytoe i distantsionnoe obrazovanie*, 2004, no. 2, pp. 52–62.

9. Li, V. Ontologicheskii podkhod k avtomaticheskoy generatsii voprosov v intellektual'nykh obuchayushchikh sistemakh [Ontological approach to automatic question generation in intelligent learning systems]. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki*, 2020, vol. 18, no. 5, pp. 44–52. DOI: <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-44-52>

10. Vinu, E.V., Kumar, P.S. Automated generation of assessment tests from domain ontologies. *Semantic Web*, 2015, vol. 8, no. 6, pp. 1023–1047.

11. Le, N.T. Using Semantic Web for Generating Questions: Do Different Populations Perceive Questions Differently? Transactions on Computational Collective Intelligence XVIII. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, pp. 1–19.

12. Studer, R., Benjamins, R., Fensel, D. Knowledge Engineering: Principles and methods. *Data and knowledge engineering*, 1998, vol. 25, pp. 161–197.

ПАМЯТИ ДМИТРИЯ ПАВЛОВИЧА ЛЕДЯНКИНА (к 110-летию со дня рождения)



В этом году исполняется 110 лет со дня рождения Дмитрия Павловича Ледянкина, одного из видных ученых Ивановского энергетического института (ныне ИГЭУ им. В.И. Ленина), доктора технических наук, профессора, долгие годы возглавлявшего кафедру «Электрические системы».

Дмитрий Павлович Ледянкин родился 5 ноября 1915 года в Ярославле. В 1936 году он поступил в Ивановский энергетический институт. Будучи студентом 4-го курса, ушел добровольцем на фронт, получил тяжелые ранения. После длительного лечения в госпиталях он возвратился в институт и в 1942 году с отличием его окончил. Суровые испытания, выпавшие на долю Дмитрия Павловича Ледянкина, закалили его волю, характер, укрепили жизненные ориентиры.

Дальнейшая судьба Д.П. Ледянкина связана с родным вузом, в котором он прошел путь от ассистента до известного ученого, профессора, более 30 лет руководившего кафедрой «Электрические системы».

В 1946 году Д.П. Ледянкин успешно защитил кандидатскую диссертацию, а в 1960 году – докторскую на тему «Изучение переходных процессов в объединенных электрических системах вектор-

ными методами». Этот фундаментальный труд лег в основу дальнейших исследований, проводимых Д.П. Ледянкиным и его многочисленными учениками.

В сферу его научных интересов входили актуальные проблемы электроэнергетики: это и разработка частотных методов исследования статической устойчивости сложных электрических систем, задача их наблюдаемости и управляемости; и вопросы синтеза законов автоматического регулирования возбуждения генераторов электростанций; и получение частотных характеристик элементов электрических систем; и вопросы моделирования асинхронного режима, критерии его срыва, обеспечивающие результирующую устойчивость энергосистемы. Все его разработки отличались высоким научным уровнем и актуальностью.

Д.П. Ледянкин – автор свыше 150 научных работ, опубликованных как в нашей стране, так и за рубежом, получивших признание широкого круга специалистов. Многие результаты его исследований нашли практическое применение.

Профессор Д.П. Ледянкин вел большую научно-методическую работу. На протяжении многих лет был членом методического Совета института, Учебно-методического Совета по электроэнергетике Минвуза СССР, членом секции кибернетики электрических систем Научного Совета по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР.

Много времени и сил Д.П. Ледянкин посвящал педагогической деятельности, щедро и бескорыстно делился с молодежью своими глубокими знаниями и ценным опытом, был прекрасным лектором и воспитателем студенческой молодежи, аспирантов, снискав среди воспитанников и коллег непререкаемый авторитет. Помочь становлению не только специалиста, но и человека – в этом видел свое предназначение Дмитрий Павлович Ледянкин, Человек с большой буквы.

Научная, педагогическая и общественная деятельность Д.П. Ледянкина получила высокую оценку Родины. Он награжден орденами Красной Звезды, Трудового Красного Знамени, «Знак Почета» и многими медалями.

Светлая память о Дмитрии Павловиче Ледянкине навсегда останется в сердцах его близких, коллег и благодарных учеников.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»

В журнал принимаются рукописи в электронном виде. Средний объем статьи – 6 страниц. Статьи сопровождаются двумя рецензиями – кафедральной (с места работы автора с указанием даты обсуждения и номера протокола) и внешней.

Правила оформления статьи.

Обязательно указывается УДК.

Фамилия, имя, отчество авторов полностью, место работы, должность, звание, ученая степень, страна и город, контактная информация (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Название статьи (на русском и английском языках), *авторское резюме* (на русском и английском языках), ключевые слова (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Основной текст располагается **в две колонки**, используется шрифт **Arial**, размер шрифта – **10**.

Графики и рисунки должны быть выполнены на компьютере, желательно в программах векторной графики либо в Word. Надписей на рисунках (кроме основополагающих понятий) быть не должно, они обозначаются цифрами и далее расшифровываются, а все расшифровки выносятся под рисунок, размер шрифта – 9 (шрифт **Arial**). Рисунки, так же, как и графики, должны быть **только черно-белыми**, любые другие цвета недопустимы.

Формулы набираются в редакторе формул Math Type (шрифт **Arial**), размер шрифта – **10**, располагаются в тексте в одну колонку.

В конце статьи размещаются пристатейные библиографические списки (на русском языке и References).

Примеры оформления авторского резюме и библиографических списков см. на сайте:

<http://vestnik.ispu.ru/ru/node/14>

Редакционно-издательский отдел оставляет за собой право на редактирование статей.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 6

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Реестровая запись от 18.01.2022 г. серия ПИ № ФС77-82616

Подписано в печать 1.12.2025. Выход в свет 28.12.2025. Формат 60х84 ¹/₈.
Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 11,95. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции журнала: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
Ивановский государственный энергетический университет

Адрес издательства: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
Ивановский государственный энергетический университет

Типография ООО «ПресСто»: 153025, Ивановская область, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, строение 8