



Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ)

Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Vestnik IGEU)

Журнал издается с 2001 года

ISSN 2072-2672

Индекс 18079

2024 / Вып. 3

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

В.И. Мурко, В.И. Карпенко, М.П. Баранова, В.В. Бухмиров, Е.Н. Темлянцева. Особенности сжигания композиционных водородных топлив.....**5**

Ю.А. Петрова, В.Ю. Соколов. Реализация методики проектирования теплогенерирующих объектов с использованием автоматизированных расчетов и ориентацией на типовое проектирование..... **13**

О.Б. Колибаба, М.В. Козлова, А.Б. Горяев. Разработка критериев оценки эффективности методов обращения с твердыми коммунальными отходами.....**20**

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

В.Д. Лебедев, Д.Г. Григорьев. Анализ частотных характеристик токовых датчиков цифрового трансформатора тока и напряжения.....**29**

В.П. Голов, Д.Н. Кормилицын, О.С. Суханова. Сравнение характеристик линий высокого и сверхвысокого напряжений при выборе параметров управляемого устройства продольной компенсации.....**39**

А.Н. Назарычев, Д.А. Полкошников, А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, М.А. Захаров, А.А. Скоробогатов. Исследование сигнала внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя в режиме выбега.....**46**

Л.Р. Гайнуллина, Хассан Фуад Алхадж. О влиянии неопределенностей на прогнозы ветрового ресурса и выработки электроэнергии.....**55**

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

А.Е. Барочкин. Методология матричного моделирования многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических комплексов.....**64**

В.К. Семенов, Н.Б. Иванова, И.И. Черняева. Применение принципа Понтрягина для оптимального отключения энергетического ядерного реактора.....**71**

А.Н. Лабутин, А.А. Андреенков, Е.А. Шуина, Ю.Н. Пономарева. Сравнительный анализ вариантов построения алгоритмов управления температурой в химическом реакторе.....**78**

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

2024 / Issue 3

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

V.I. Murko, V.I. Karpenok, M.P. Baranova, V.V. Bukhmirov, E.N. Temlyantseva. Features of combustion of composite coal-water fuel.....**5**

Yu.A. Petrova, V.Yu. Sokolov. Implementation of the methodology to design heat generating facilities using automated calculations and focusing on standard design.....**13**

O.B. Kolibaba, M.V. Kozlova, A.B. Garyaev. Development of criteria to evaluate effectiveness of solid municipal waste management methods.....**20**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

V.D. Lebedev, D.G. Grigoriev. Analysis of frequency-dependent characteristics of digital current and voltage transformer current sensors.....**29**

V.P. Golov, D.N. Kormilitsyn, O.S. Sukhanova. Comparison of characteristics of lines of high and extra-high voltage when selecting the parameters of controlled device of series compensation.....**39**

A.N. Nazarychev, D.A. Polkoshnikov, A.S. Strakhov, E.M. Novoselov, M.A. Zakharov, A.A. Skorobogatov. Study of the external magnetic field signal of an asynchronous electric motor in run-down mode.....**46**

L.R. Gainullina, Hassan Fouad Alhaji. On the impact of uncertainties on wind resource and power generation forecasts.....**55**

**MATHEMATICAL METHODS
IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY**

A.E. Barochkin. Methodology of matrix modeling of multicomponent multiflow multi-stage energy complexes.....**64**

V.K. Semenov, N.B. Ivanova, I.I. Chernyaeva. Application of Pontryagin principle for optimal shutdown of a nuclear power reactor.....**71**

A.N. Labutin, A.A. Andreenkov, E.A. Shuina, Yu.N. Ponomareva. Comparative analysis of options for temperature control algorithms design in a chemical reactor.....**78**

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 665.765:621.771.014.2

Василий Иванович Мурко

ФГБОУ ВО «Сибирский индустриальный университет», директор Центра инновационных угольных технологий, доктор технических наук, профессор, Россия, Новокузнецк, e-mail: sib_eco@mail.ru

Виктор Иванович Карпенко

Филиал ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кандидат технических наук, доцент кафедры ТДиИТ, Россия, Новокузнецк, e-mail: vkarpenok@mail.ru

Марина Петровна Баранова

ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой системозенергетики, Россия, Красноярск, e-mail: marina60@mail.ru

Вячеслав Викторович Бухмиров

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, e-mail: bao6095@mail.ru

Елена Николаевна Темлянцева

ФГБОУ ВО «Сибирский индустриальный университет», кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Россия, Новокузнецк, e-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru

Особенности сжигания композиционных водоугольных топлив¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Россия обладает мощными запасами угля, в среднем до 173 млрд тонн, и, хотя доля угольной генерации в целом по России относительно невелика (около 20–22 %), в Сибирском федеральном округе она достигает 65 %. Россия не может отказаться от угля, но необходимо модернизировать и повысить энергоэффективность ТЭС и котельных, работающих на угле. В настоящее время разработаны технологии получения и использования композиционного водоугольного топлива (ВУТ) с разными добавками, в первую очередь органического происхождения, для улучшения его целевых характеристик. Исследование характеристик таких водоугольных суспензий показало перспективность их использования в качестве топлива в большой и малой теплоэнергетике как с экономической точки зрения, так и с точки зрения экологической безопасности. Однако отсутствие экспериментальных данных по сжиганию композиционных водоугольных топлив в стендовых и полупромышленных условиях сдерживает дальнейшее развитие технологии использования водоугольных топлив. В связи с этим актуальным является исследование особенностей сжигания композиционных водоугольных топлив из углей разной степени метаморфизма.

¹ Работа выполнена за счет гранта РФФИ (проект 23-29-00728).

The study is supported by a grant of the Russian Science Foundation (project 23-29-00728).

Материалы и методы. Для приготовления опытных партий композиционного водоугольного топлива использованы рядовые угли и угольные шламы различной стадии метаморфизма (марки Д, СС, Т), сжигание которых осуществлено на стендовой полупромышленной установке. Результаты исследования обработаны с использованием методов математической статистики и регрессионного анализа.

Результаты. Установлено влияние механической активации водоугольного топлива на вязкость и температуру его воспламенения и горения. Определены особенности сжигания композиционных водоугольных топлив с применением пневмомеханических форсунок двух типов. Определен состав вредных выбросов при сжигании водоугольных топлив.

Выводы. Установлена возможность использования композиционных водоугольных топлив для розжига котлов большой мощности. Показано что сжигание водоугольных топлив является экологически более безопасным по сравнению со сжиганием угольного и других видов топлива.

Ключевые слова: композиционное водоугольное топливо, механическая активация, пневмомеханические форсунки, температура воспламенения топлива, температура горения топлива

Vasily Ivanovich Murko

Siberian Industrial University, Director of the Center of Innovative Coal Technologies, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Russia, Novokuznetsk, e-mail: sib_eco@mail.ru

Viktor Ivanovich Karpenok

Branch of Kuzbass State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Technical Sciences and IT Department, Russia, Novokuznetsk, e-mail: vkarpenok@mail.ru

Marina Petrovna Baranova

Krasnoyarsk State Agrarian University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor, Head of System Energy Department, Russia, Krasnoyarsk, e-mail: marina60@mail.ru

Vyacheslav Viktorovich Bukhmirov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: bao6095@mail.ru

Elena Nikolaevna Temlyantseva

Siberian Industrial University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Thermal Power Engineering and Ecology Department, Russia, Novokuznetsk, e-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru

Features of combustion of composite coal-water fuel

Abstract

Background. Russia has large coal reserves, on the average up to 173 billion tons. Although, the share of coal generation in Russia is relatively small (about 20–22 %), it reaches 65 % in the Siberian Federal District. Russia cannot deny coal, but it is necessary to update and improve energy efficiency of Thermal Power Plants (TPP) and boiler houses that burn coal. Currently, technologies have been developed to produce and use composite coal-water fuel (CWF) with various additives, primarily of organic origin to improve its target characteristics. A study of the characteristics of such coal-water suspensions has proved the promising outlook of their use as fuel in large and small Thermal Power Plants, both from an economic and environmental safety points of view. However, the lack of experimental data on the issues of combustion of composite coal-water fuel in bench-scale and semi-industrial conditions hinders the further development of CWF technology. Thus, it is relevant to study the features of combustion of composite coal-water fuels from coals of varying degrees of metamorphism.

Materials and methods. To prepare experimental batches of composite CWF, raw coals and coal slurries of various stages of metamorphism (grades D, SS, T) have been used. They were burned in a bench-scale semi-industrial plant. The research results have been processed using the methods of mathematical statistics and regression analysis.

Results. The influence of mechanical activation of CWF on the viscosity and temperature of its ignition and combustion has been established. The features of combustion of composite coal-water fuel using pneumomechanical injectors of two types are determined. The composition of harmful emissions during the combustion of CWF has been determined.

Conclusions. The possibility to use composite coal-water fuel to ignite high-power boilers has been established. It has been proved that the combustion of CWF is environmentally safer compared to the combustion of coal and other types of fuel.

Key words: Composite water-coal fuel, mechanical activation, pneumomechanical injectors, ignition temperature of fuel, combustion temperature of fuel

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.005-012

Введение. Россия обладает мощными запасами угля, в среднем до 173 млрд тонн, и, хотя доля угольной генерации в целом по России относительно невелика (около 20–22 %), в Сибирском федеральном округе она достигает 65 %, а в Дальневосточном регионе до 93 %. Россия не может отказаться от угля, но необходимо модернизировать и повысить энергоэффективность ТЭС и котельных, работающих на угле.

В настоящее время для улучшения целевых характеристик топлив разработаны технологии получения и использования композиционного водоугольного топлива (ВУТ) из углей разной степени метаморфизма с разными добавками [1, 2]. Получены новые составы суспензионного водоугольного топлива с применением компонентов органического происхождения [3, 4]. Композиционное ВУТ удобно применять на объектах химических производств, где остается вода с большим содержанием метилового или этилового спирта или загрязненная другими веществами. Исследование характеристик таких водоугольных суспензий показало перспективность их использования в качестве топлива в большой и малой теплоэнергетике как с экономической точки зрения, так и с позиций экологической безопасности.

В ходе получения композиционных топлив возможно также использовать способность применяемых компонентов образовывать с тонкоизмельченными угольными частицами гранулы (метод масляной грануляции). Это позволяет совмещать процесс приготовления топлива и обогащения угля за счет удаления глинистых минеральных компонентов, что увеличивает рабочую теплоту сгорания. Получаемая в результате водоуглемасляная суспензия является промежуточным продуктом при дальнейшем ожигении угля путем механохимических и электроимпульсных воздействий [5, 6]. Использование дополнительного высокорекреационного органического компонента придает новые качества получаемому жидкому топливу из угля (снижение температуры вспышки и, соответственно, повышение устойчивости горения, существенное снижение температуры замерзания).

Композиционное водоугольное топливо можно использовать для растопки тепловых агрегатов, после чего можно перейти на обыкновенное водоугольное топливо. Для растопки желательно использовать марки угля с возможно большим содержанием летучих (например, угли марки Д или Г) либо угли марки Т с дополнительным содержанием спирта (вплоть до 30 %).

Композиционное ВУТ также используется в агрегатах, где желательно иметь возможно большее содержание дымовых газов, например в аэродинамических сушилках типа кипящего слоя или вихревых.

Целью исследования было выявление особенностей сжигания композиционных водоугольных топлив из углей и угольных шламов разной степени метаморфизма.

Материалы и методы исследования. Экспериментальные исследования проводились на стендовой опытно-промышленной установке СибГИУ [7].

В ходе экспериментальных работ из различных марок углей были получены партии суспензионного водоугольного топлива с требуемыми структурно-реологическими и теплофизическими характеристиками. Для получения ВУТ были использованы рядовые угли и угольный шлам различных стадий метаморфизма и зольности Кузнецкого угольного бассейна марок ДР, СС, Т. В табл. 1 представлена техническая характеристика этих углей.

На основе представленных углей были приготовлены опытные партии композиционных ВУТ с применением нефти и отработанных масел, метилового и этилового спиртов. Пробы ВУТ анализировали на содержание твердой фазы, на гранулометрический состав и вязкость. Показатели определяли стандартными методами согласно существующим ГОСТам и нормативным документам. Для приготовления топлива использовали молотковую дробилку и вибромельницу мокрого измельчения. Активацию топлива производили насосом-активатором.

Результаты исследований. В табл. 2 представлена характеристика водоугольного топлива, полученного путем мокрого помола в вибромельнице и обработанного в насосе-активаторе.

Таблица 1. Техническая характеристика углей

Марка угля	Химический состав, %			Высшая теплота сгорания, МДж/кг
	зольность, A^{daf}	влага, W^t	летучие, V^{daf}	
Д, Г	15,0–18,0	10,0–12,0	41,5–43,5	31,8
СС (шлам)	22,0–36,6	18,0–20,0	27,0	34,8
Т	16,0–20,0	6,0–10,0	8,0–14,0	34,8

Таблица 2. Характеристика опытных партий композиционного ВУТ

Наименование показателя	Технология приготовления	
	мокрый помол в вибромельнице	мокрый помол в вибромельнице + обработка в насосе-активаторе
Марка угля	СС	СС
Гранулометрический состав, %		
+0,355 мм	2,8	1,8
0,250–0,355 мм	5,2	4,4
0,160–0,250 мм	8,5	8,2
0,071–0,160 мм	26,2	25,2
–0,071 мм	57,3	60,4
Массовая доля твердой фазы, %	58,4	58,4
Зольность A^d , %	7,9	7,9

Анализ данных (табл. 2) показывает, что однократный пропуск ВУТ через насос-активатор обеспечивает увеличение выхода микронных частиц (кл. –0,071 мм) более чем на 3 % (абс.), что способствует как улучшению стабильности топлива (отсутствие осадка в течение более 30 суток), так и снижению его вязкости в 1,3 раза, что было зафиксировано также при обработке водоугольной суспензии специальным насосом-активатором на углехимическом комбинате в г. Хэган (КНР) [8].

Аналогичные результаты были получены и для опытных партий композиционного ВУТ, приготовленного из других марок углей (Д и Т) [9]. При приготовлении опытных партий композиционного ВУТ использовались исходный уголь и угольный шлам, предварительно обогащенный методом масляной грануляции с расходом масляного агента от 5 до 8 %.

В табл. 3 представлена характеристика композиционного ВУТ.

На рис. 1 представлены кривые течения композиционных водоугольных топлив, полученные путем обработки данных измерения вязкости ВУТ на ротационном вискозиметре REOTEST в диапазоне скоростей сдвига от 9 до 100 c^{-1} [1] по формулам:

$$\tau = k\dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

где τ – напряжение сдвига, Па; k – коэффициент консистенции, Па·сⁿ; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с⁻¹; n – индекс потока;

$$\tau = \tau_0 + \mu_{стр} \cdot \dot{\gamma}, \quad (2)$$

где τ_0 – начальное напряжение сдвига, Па; $\mu_{стр}$ – пластическая или структурная вязкость, Па·с.

Таблица 3. Характеристика опытных партий композиционного водоугольного топлива

№ партии	Предприятие	Марка угля, угольного шлама	Зольность A^d , %	Количество этилового спирта от общей массы ВУТ, %	Массовая доля твердой фазы, %	Теплота сгорания, МДж/кг (ккал/кг)	Стабильность, сут.
1	Разрез «Талдинский»	ДГ	4,8	15,0	62,2	24,1 (5763)	28
2	Шахта «Тырганская»	СС _ш	8,5	14,8	65,3	25,1 (6000)	>30
3	ОФ «Красногорская»	Т	8,0	15,0	65,2	25,5 (6100)	25

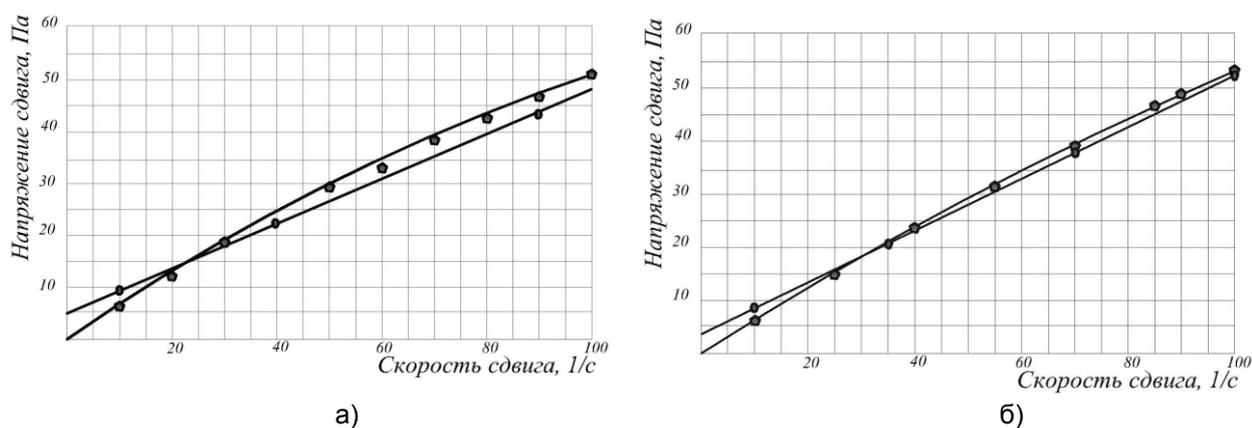


Рис. 1. Кривые течения композиционных водоугольных топлив: а – ВУТ с добавлением спирта не более 2 % (от жидкой фазы); б – ВУТ с добавлением спирта 30 % (от жидкой фазы)

Анализ полученных зависимостей (рис. 1) показывает, что как степенная модель (1), так и модель Бингама (2) практически одинаково описывают течение ВУТ в указанном диапазоне скоростей сдвига (среднеквадратическое отклонение не превышает 13 %). При этом наличие спиртового компонента не оказывает существенного влияния на структурно-реологические характеристики композиционного топлива.

Опытные партии ВУТ сжигались в вихревой адиабатической топке опытно-промышленной установки [7]. Сжигание осуществлялось путем тангенциальной подачи струи распыленного ВУТ и дутьевого воздуха в топку. Розжиг топлива осуществлялся с помощью дизельной горелки или плазмотрона. Для распыла композиционного водоугольного топлива использовалось два типа пневмомеханических форсунок – внутреннего и внешнего смешения.

Пневмомеханическая форсунка внутреннего смешения характеризуется тем, что распыляющий газовый агент (воздух или водяной пар) подается во внутреннюю цилиндрическую полость форсунки тангенциально, а газотопливная смесь через центральное сопло вылетает в камеру сжигания. Под действием аэродинамических сил и сил сопротивления окружающей среды происходит образование топливных водоугольных капель различного размера и чистых угольных частиц с размером, как правило, более 90–150 мкм [10, 11]. Каждая отдельная струя распыленного топлива представляет собой конус. При наличии четырех или более струй (для форсунки большой производительности) можно организовать большой полый конус.

Работа пневматической форсунки внешнего смешения [12] отличается тем,

что подача распыляющего газового агента (воздуха) осуществляется с внешней поверхности струи топлива. При этом за счет организованной крутки распыляющего воздуха осуществляется срыв топливной пленки с последующим образованием топливных капель. Струя распыленного топлива представляет собой полый конус.

В табл. 4 представлено сравнение работы форсунок двух типов (внутреннего и внешнего смешения).

В результате исследований установлено, что для надежной работы форсунки внутреннего смешения имеются более жесткие ограничения по максимальной крупности угольных частиц в ВУТ, для чего необходима установка фильтра тонкой очистки. Конструкция такого фильтра была разработана для стендовой и промышленных установок сжигания ВУТ [13]. Форсунка внешнего смешения менее требовательна к размеру твердых частиц в топливе, однако требует более высокого расхода (в 1,5 раза) распыляющего агента (табл. 4), а при повышении вязкости топлива качество распыла резко ухудшается, что сказывается на устойчивости режима горения.

На рис. 2 проиллюстрировано влияние активации топлива насосом-активатором на гидравлические характеристики топливного тракта при работе форсунки внутреннего смешения. Анализ полученных кривых показывает, что требуемый расход ВУТ (60 л/ч) обеспечивается при давлении 2,65 ати (для неактивированного топлива), в то время как для активированного топлива аналогичный расход достигается уже при давлении 1,5 ати.

Таблица 4. Характеристика работы форсунок

Наименование параметра	Тип форсунки	
	внутреннего смешения	внешнего смешения
Расход ВУТ, л/ч	60	60
Давление ВУТ, МПа	0,2–0,3	0,17
Содержание твердой фазы, %	62,0	62,0
Расход сжатого воздуха, нм ³ /ч	150	220
Давление сжатого воздуха, МПа	0,3	0,2

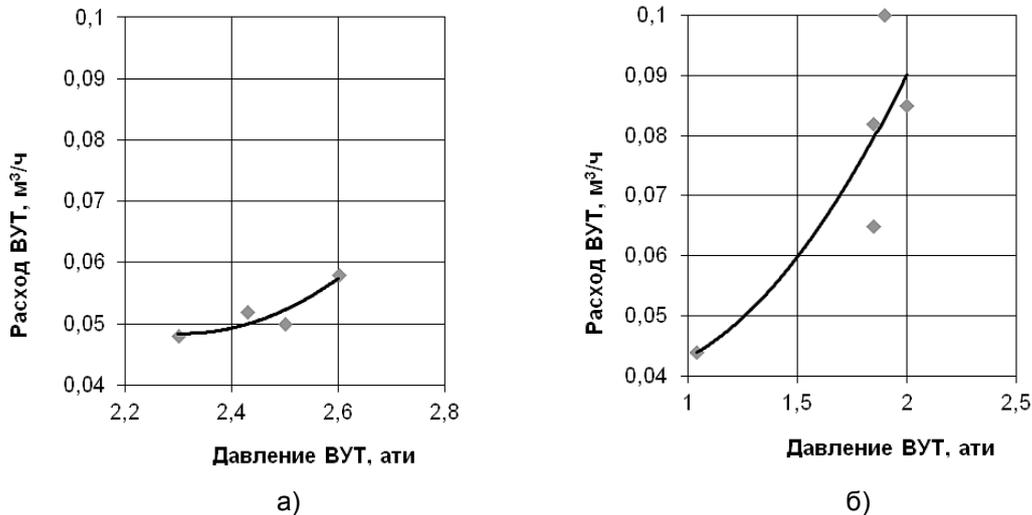


Рис. 2. Расходно-динамические характеристики тракта подачи топлива (форсунка внутреннего смешения): а – топливо не активировано; б – топливо активировано

Розжиг топки. Исследование розжига композиционного водонефтеугольного топлива показало, что указанный процесс в принципе аналогичен розжигу ВУТ без дополнительных компонентов. Меняется только температурный режим, и, ввиду того что низшая теплота сгорания композиционных топлив с добавлением нефти, отработанных масел и спирта выше в сравнении с обычным ВУТ, снижается расход топлива во время работы в стационарном режиме. Стационарный температурный режим в топке составляет 1050–1100 °С. Повышение указанного температурного уровня ведет к размягчению зольной части топлива и ее налипанию на окружающие твердые поверхности.

Установлено, что добавка спирта в количестве 15 % (масс.) от водной фазы при использовании угля марки ДГ снижает температуру воспламенения топлива на 100–150 °С. В этом случае для эффективного воспламенения необходимо повысить содержание спирта в воде до 30–35 %, тогда топливо воспламеняется в топке уже при температуре 200–250 °С. При подаче горячего дутья с температурой 150–200 °С (что легко осуществить на котлах ТЭЦ и ГРЭС) имеется возможность разжигать

топку на композиционном ВУТ при его первичном зажигании соляной горелкой или плазмотроном. Композиционное топливо, приготовленное из углей марки Т с применением спирта разжигается так же, как обычное водоугольное топливо. В данном случае спиртовой агент выполняет роль летучих веществ.

Содержание вредных веществ в топочных газах. Состав дымовых газов при сжигании водоугольного, композиционного и других видов топлива практически остается неизменным. Содержание вредных веществ в топочных газах при сжигании композиционного топлива показано на рис. 3.

Анализ состава топочных газов на наличие вредных веществ (рис. 3) показывает, что содержание СО с ростом температуры снижается до 100 мг/м³. Необходимо отметить, что при более тщательной регулировке количества дутьевого воздуха можно добиться снижения содержания СО до 50 мг/м³. При отборе проб газа за пределами топки количество СО еще ниже, что обусловлено дожиганием СО до СО₂. Содержание NO_x незначительно возрастает с ростом температуры, но остается на уровне, в несколько раз ниже, по сравне-

нию со сжиганием мазута, природного газа или пылевидного угольного топлива. Таким образом, сжигание ВУТ и композиционных жидких угольных топлив более экологично и более эффективно, чем сжигание других видов топлива.

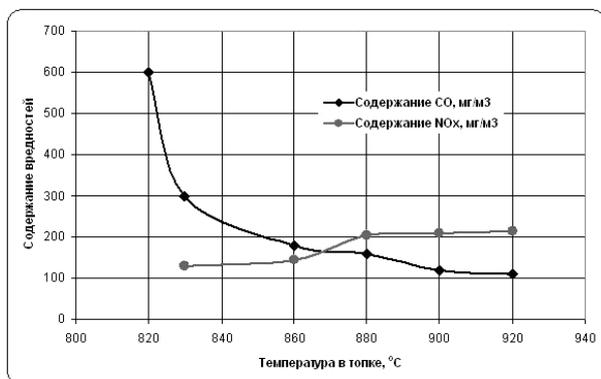


Рис. 3. Содержание вредных веществ в топочных газах

Выводы. Проведенные исследования позволили установить:

- возможность получения композиционного водоугольного топлива различного состава из углей и угольных шламов различной стадии метаморфизма с требуемыми структурно-реологическими и теплофизическими характеристиками;
- возможность снижения вязкости композиционного топлива в 1,3–1,5 раза за счет его механической активации в насосе-активаторе;
- температурные режимы процесса розжига и стабильного горения композиционного ВУТ;
- уровень вредных выбросов при сжигании композиционных ВУТ.

Сравнительная характеристика работы форсунок ВУТ внутреннего и внешнего смешения позволила определить их достоинства и недостатки.

Список литературы

1. **Заостровский А.Н., Мурко В.И.** Технология получения и использования высокореакционного водоугольного топлива // Кокс и химия. – 2023. – № 9. – С. 18–26.
2. **Овчинников Ю.В., Бойко Е.Е.** Технология получения и исследования тонкодисперсных водоугольных суспензий. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – С. 308.
3. **Зенков А.В.** Свойства водоугольных топлив с добавлением жидких горючих компонентов и характеристики их распыления для

котлов промышленной теплоэнергетики: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – Томск, 2021.

4. **Валиуллин Т.Р.** Повышение эффективности сжигания композиционного жидкого топлива на тепловых электрических станциях по условиям его зажигания: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – Томск, 2017.

5. **Обработка** водоугольной суспензии электроимпульсным способом / В.И. Мурко, М.Ю. Журков, С.Ю. Дацкевич и др. // Углекислотная и экология Кузбасса: тез. докл. XII Междунар. российско-казахстанского симпозиума. – Кемерово, 2023. С. 63.

6. **Получение** и использование углемасляного гранулята / В.И. Мурко, А.Н. Заостровский, А.Е. Аникин, Е.Н. Темлянцева // Кокс и химия. – 2022. – № 10. – С. 45–50.

7. **Разработка** и создание инновационного научно-образовательного кластера по комплексному использованию угля и продуктов его переработки / В.И. Мурко, Е.В. Протопопов, М.В. Темлянец и др. // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. АС'2019: Труды XII Всерос. науч.-практ. конф. (с международным участием) / под общ. ред. С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева. – Новокузнецк, 2019. – С. 48–53.

8. **Результаты** обработки водоугольной суспензии насосом-активатором / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенко и др. // Углекислотная и экология Кузбасса: тез. докл. XII Междунар. российско-казахстанского симпозиума. – Кемерово, 2023. – С. 54.

9. **Результаты** исследования влияния механической активации на структурно-реологические характеристики угольных суспензий на основе фильтр-кеков / В.И. Мурко, Г.Д. Вахрушева, В.И. Федяев и др. // Журнал Сибирского федерального университета. Сер.: Техника и технологии. – 2011. – Т. 4, № 6. – С. 601–612.

10. **Сенчурова Ю.А.** Совершенствование технологии сжигания водоугольного топлива в вихревых топках: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Политехнический институт ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – Кемерово, 2008.

11. **Карпенко В.И.** Совершенствование технологии сжигания водоугольного топлива в теплогенераторах малой и средней мощности: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – Кемерово, 2022.

12. **Пат. 2346756** Российская Федерация МПК В05В 7/08. Пневматическая форсунка / Л.И. Мальцев; опубл. 02.20.2009.

13. Пат. 91885 Российская Федерация МПК В01D 35/00. Фильтр для очистки высоковязких жидкостей / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.Н. Звягин, Л.А. Смердов, В.И. Карпенко; опубл. 03.10.2010.

References

1. Zaostrovskiy, A.N., Murko, V.I. *Tekhnologiya polucheniya i ispol'zovaniya vysoko-reaktsionnogo vodougol'nogo topliva* [Technology of production and use of highly reactive coal-water fuel]. *Koks i khimiya*, 2023, no. 9, pp. 18–26.
2. Ovchinnikov, Yu.V., Boyko, E.E. *Tekhnologiya polucheniya i issledovaniya tonkodispersnykh vodougol'nykh suspenziy* [Technology of producing and studying finely dispersed coal-water suspensions]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2017, p. 308.
3. Zenkov, A.V. *Svoystva vodougol'nykh topliv s dobavleniem zhidkikh goryuchikh komponentov i kharakteristiki ikh raspyleniya dlya kotlov promyshlennoy teploenergetiki*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Properties of coal-water fuels with liquid combustible components and characteristics of their atomization for industrial thermal power boilers. Abstr. cand. tech. sci. diss.]. – Tomsk, 2021.
4. Valiullin, T.R. *Povyshenie effektivnosti szhiganiya kompozitsionnogo zhidkogo topliva na teplovykh elektricheskikh stantsiyakh po usloviyam ego zazhiganiya*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Increasing the efficiency of combustion of composite liquid fuel at thermal power plants according to the conditions of its ignition. Abstr. cand. tech. sci. diss.]. Tomsk, 2017.
5. Murko, V.I., Zhurkov, M.Yu., Datskevich, S.Yu., Bukharkin, A.A., Zhumaev, S.S., Karpenok, V.I. *Obrabotka vodougol'noy suspenzii elektroimpul'snym sposobom* [Treatment of coal-water suspension by electric pulse method]. *Tezisy dokladov XII Mezhdunarodnogo rossiysko-kazakhstanskogo simpoziuma «Uglekhimiya i ekologiya Kuzbassa»* [Proceedings of XII international Russian-Kazakh symposium “Coal chemistry and ecology of Kuzbass”]. Kemerovo, 2023, p. 63.
6. Murko, V.I., Zaostrovskiy, A.N., Anikin, A.E., Temlyantseva, E.N. *Poluchenie i ispol'zovanie uglemaslyanogo granulyata* [Production and use of coal-oil granulate]. *Koks i khimiya*, 2022, no. 10, pp. 45–50.
7. Murko, V.I., Protopopov, E.V., Temlyantsev, M.V., Chaplygin, V.V., Litvinov, Yu.A., Volkov, M.A. *Razrabotka i sozdanie innovatsionnogo nauchno-obrazovatel'nogo klastera po kompleksnomu ispol'zovaniyu uglya i produktov ego pererabotki* [Development and creation of an innovative scientific and educational cluster on the integrated use of coal and processed products]. *Trudy XII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem) «Sistemy avtomatizatsii v obrazovanii, nauke i proizvodstve. AS'2019»* [Proceedings of XII All-Russian scientific-practical conference (with international participation) “Automation systems in education, science, and production. AS'2019”]. Novokuznetsk, 2019, pp. 48–53.
8. Murko, V.I., Fedyaev, V.I., Karpenok, V.I., Vezhan, V.G., Jao, L., Li, D., Zhen', L., Chzhou, G. *Rezultaty obrabotki vodougol'noy suspenzii nasosom aktivatorom* [Results of treatment of coal-water suspension with an activator pump]. *Tezisy dokladov XII Mezhdunarodnogo rossiysko-kazakhstanskogo simpoziuma «Uglekhimiya i ekologiya Kuzbassa»* [Proceedings of XII international Russian-Kazakh symposium “Coal chemistry and ecology of Kuzbass”]. Kemerovo, 2023, p. 54.
9. Murko, V.I., Vakhrusheva, G.D., Fedyaev, V.I., Karpenok, V.I., Mastikhina, V.P., Dzyuba, D.A. *Rezultaty issledovaniya vliyaniya mekhanicheskoy aktivatsii na strukturno-reologicheskie kharakteristiki ugol'nykh suspenziy na osnove fil'tr-kekov* [Results of the study of influence of mechanical activation on the structural and rheological characteristics of coal suspensions based on filter cakes]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Ser.: Tekhnika i tekhnologii*, 2011, vol. 4, no. 6, pp. 601–612.
10. Senchurova, Yu.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii szhiganiya vodougol'nogo topliva v vikhrevykh topkakh*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Improving the technology of burning coal-water fuel in vortex furnaces. Abstr. cand. tech. sci. diss.]. Kemerovo, 2008.
11. Karpenok, V.I. *Sovershenstvovanie tekhnologii szhiganiya vodougol'nogo topliva v teplogeneratorakh maloy i sredney moshchnosti*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Improving the technology of burning coal-water fuel in heat generators of low and medium power. Abstr. cand. tech. sci. diss.]. Kemerovo, 2022.
12. Mal'tsev, L.I. *Pnevmaticheskaya forsunka* [Pneumatic atomizer]. Patent RF, no. 2346756, 2009.
13. Murko, V.I., Fedyaev, V.I., Zvyagin, V.N., Smerdov, L.A., Karpenok, V.I. *Fil'tr dlya ochistki vysokovyazkikh zhidkostey* [Filter for purifying highly viscous liquids]. Patent RF, no. 91885, 2010.

УДК 621.64/.69

Юлия Александровна Петрова

Оренбургский государственный университет, магистрант кафедры электро- и теплоэнергетики, Россия, Оренбург, e-mail: MironovaYu99@gmail.com

Виталий Юрьевич Соколов

Оренбургский государственный университет, кандидат технических наук, доцент кафедры электро- и теплоэнергетики, Россия, Оренбург, e-mail: teploosu@mail.ru

Реализация методики проектирования теплогенерирующих объектов с использованием автоматизированных расчетов и ориентацией на типовое проектирование

Авторское резюме

Состояние вопроса. Качество выполнения проекта во многом определяет работоспособность и экономичность проектируемого объекта. Существуют различные методы проектирования, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки, анализ которых можно найти в опубликованных исследованиях. В связи с этим была разработана методика, позволяющая уменьшить вероятность допущения ошибки в построении системы и сократить время с помощью использования расчетных программ. Целью данного исследования является реализация разработанной нами методики на примере проектирования насосной аккумулирующих баков.

Материалы и методы. Исследование проведено на модели трубопровода, построенной в программе СТАРТ-Проф, позволяющей с большой точностью оценить нагрузки от всех воздействий (температурных, весовых и т.д.) на трубопроводы и оборудование.

Результаты. На основе анализа существующих методов проектирования разработана собственная методика, опирающаяся на типовое проектирование и предполагающая использование средств автоматизации прочностных расчетов. Выполнены построение обвязки насосного оборудования по разработанной методике и расчет построенной модели. Получены значения нагрузки на штуцера оборудования. Дан анализ полученных значений, свидетельствующий о работоспособности системы, а следовательно, и о рациональности выбранной методики.

Выводы. Полученные результаты подтверждают достоинства разработанной методики. Предложенная методика может широко применяться в любых сферах проектирования, помимо теплогенерации. Дальнейшее совмещение методики с различными средствами автоматизации, например концепцией BIM-проектирования, позволит усилить ее достоинства.

Ключевые слова: проектирование теплогенерирующих объектов, методика проектирования, типовой проект, модель трубопровода, расчет в СТАРТ-Проф

Yuliya Aleksandrovna Petrova

Orenburg State University, Master Degree Student, Electricity and Heat Power Engineering Department, Russia, Orenburg, e-mail: MironovaYu99@gmail.com

Vitaly Yurievich Sokolov

Orenburg State University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electricity and Heat Power Engineering Department, Russia, Orenburg, e-mail: teploosu@mail.ru

Implementation of the methodology to design heat generating facilities using automated calculations and focusing on standard design

Abstract

Background. The quality of the project may well determine the operability and cost-effectiveness of the designed facility. There are various design methods, each of which has its advantages and disadvantages, analysis of which can be found in published studies. Thus, a methodology has been developed to reduce the

likelihood of an error during system design and to reduce time using calculation programs. The purpose of this study is to implement the developed methodology using the example of designing pumping storage tanks.

Materials and methods. The study is carried out using a pipeline model designed in the START-Prof software, which allows one to accurately estimate the loads from all impacts (temperature, weight, etc.) on pipelines and equipment.

Results. As a result of this study, the authors have developed the methodology based on standard design and using automation tools for strengthening studies. The pumping equipment piping is completed using the developed method and the calculation of the developed model. The load values on the equipment fittings have been obtained. The analysis of the obtained values is presented proving the operability of the system, and therefore the rationality of the chosen method.

Conclusions. The results obtained confirm the advantages of the developed methodology. It can be widely used in any field of design in addition to heat generation. Further combining the methodology with various automation tools, for example, the concept of BIM design, will enhance its advantages.

Key words: design of heat generating facilities, design method, standard project, pipeline model, calculation in START-Prof

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.013-019

Введение. Одним из важнейших этапов реализации любого проекта является стадия проектирования. Существует несколько подходов к разработке проекта. Наиболее распространенным для периода СССР можно считать типовое проектирование. В качестве его достоинства выделяют быстроту применения, а в качестве недостатка – отсутствие гибкости решений [1, 2]. Также рассматриваются методы, позволяющие принимать индивидуальные решения и проводить расчет на прочность системы либо вручную, либо с помощью автоматизированных программ [3, 4]. После проведения анализа достоинств и недостатков каждого подхода была разработана методика, заключающаяся в ориентации на типовое проектирование при предварительной обвязке оборудования и в проведении автоматизированных расчетов на прочность. Она позволяет уменьшить вероятность допущения ошибки в построении системы трубопроводов обвязки основного и вспомогательного оборудования теплогенерирующих объектов и сократить время подбора оптимальной схемы расположения элементов трубопроводов, поворотов, запорной арматуры с помощью использования расчетных программ [5].

Объектом исследования является разработанная методика проектирования теплогенерирующего объекта, целью исследования – ее реализация.

Методы исследования. Методика состоит из шести этапов. Первый этап – получение технического задания. Целью проведения работ является реконструкция Ивановской ТЭЦ-2. Проектом предусмотрено:

– замена существующих насосов 1Д500-63 и 300Д-90 в аккумуляторной насосной;

– замена трубопроводов обвязки насосов в аккумуляторной насосной;

– замена запорной арматуры с установкой шаровых кранов и поворотных затворов с двусторонним уплотнением с электроприводом;

– демонтаж существующих насосов, трубопроводов и арматуры.

Второй этап – предпроектное обследование. В результате выполнения данного этапа получены следующие исходные данные:

1) габаритные размеры помещения насосной аккумуляторных баков;

2) данные об установленной запорной арматуре, насосном оборудовании;

3) существующая технологическая схема насосной аккумуляторных баков;

4) эскиз существующей обвязки насосного оборудования;

5) границы проектирования.

Пользуясь вышеперечисленной информацией, создаем чертеж существующей обвязки насосной аккумуляторных баков (рис. 1).

Реализуя третий этап методики, производим подбор нового оборудования [6]. Характеристики существующих насосов: 1Д500-63 – подача (номинальная) 500 м³/ч, напор 63 м; 300Д-90 – подача (номинальная) 300 м³/ч, напор 54 м. Воспользуемся каталогом производителя АО «ГМС Ливгидромаш». По исходным подаче и напору подбираем следующее оборудование: 1Д500-63 – подача (номинальная)

500 м³/ч, напор 63 м; 1Д315-716 – подача (номинальная) 300 м³/ч, напор 54 м. Их характеристики приведены на рис. 2, 3. Так как в нашем случае основным оборудованием являются только насосы, можно переходить к следующему этапу.

Проектом предполагается сохранение точек входа и выхода трубопроводов из здания, так как реконструкция помещения

не предусматривается. Таким образом, наиболее целесообразно сохранить, где это возможно, существующую трассировку. Однако у подобранного насосного оборудования диаметры всасывающей и нагнетательной линий не совпадают с существующими диаметрами, поэтому деформации трубопроводов от весовых и тепловых воздействий могут существенно измениться.

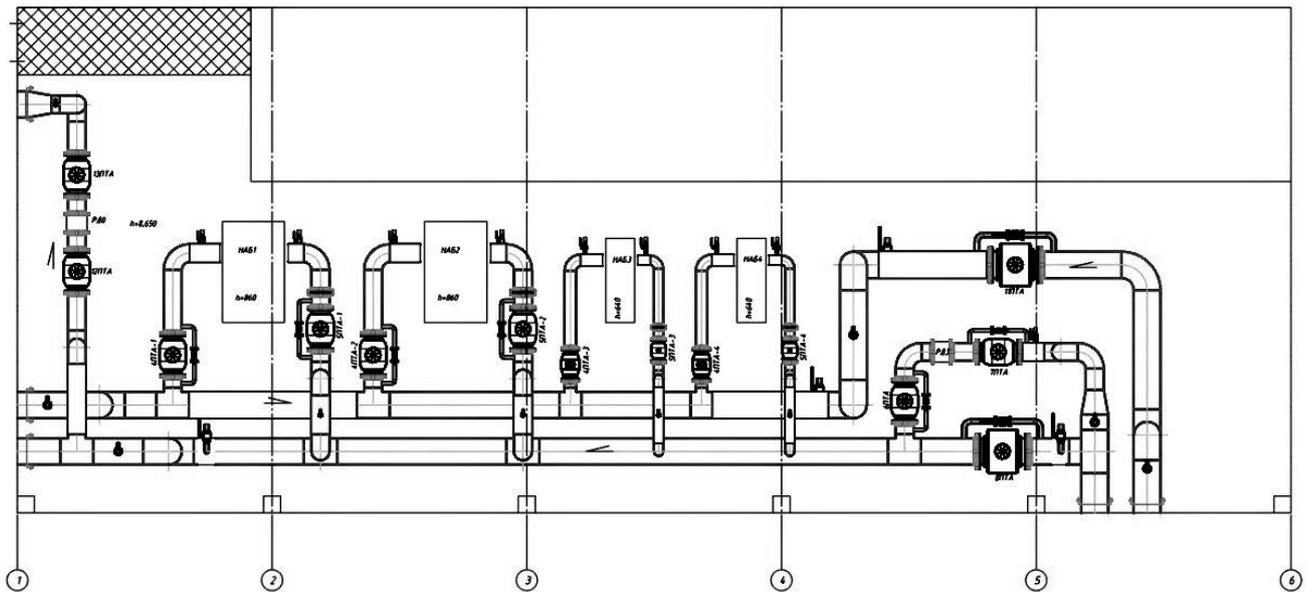


Рис. 1. Существующая обвязка насосной аккумулярующих баков

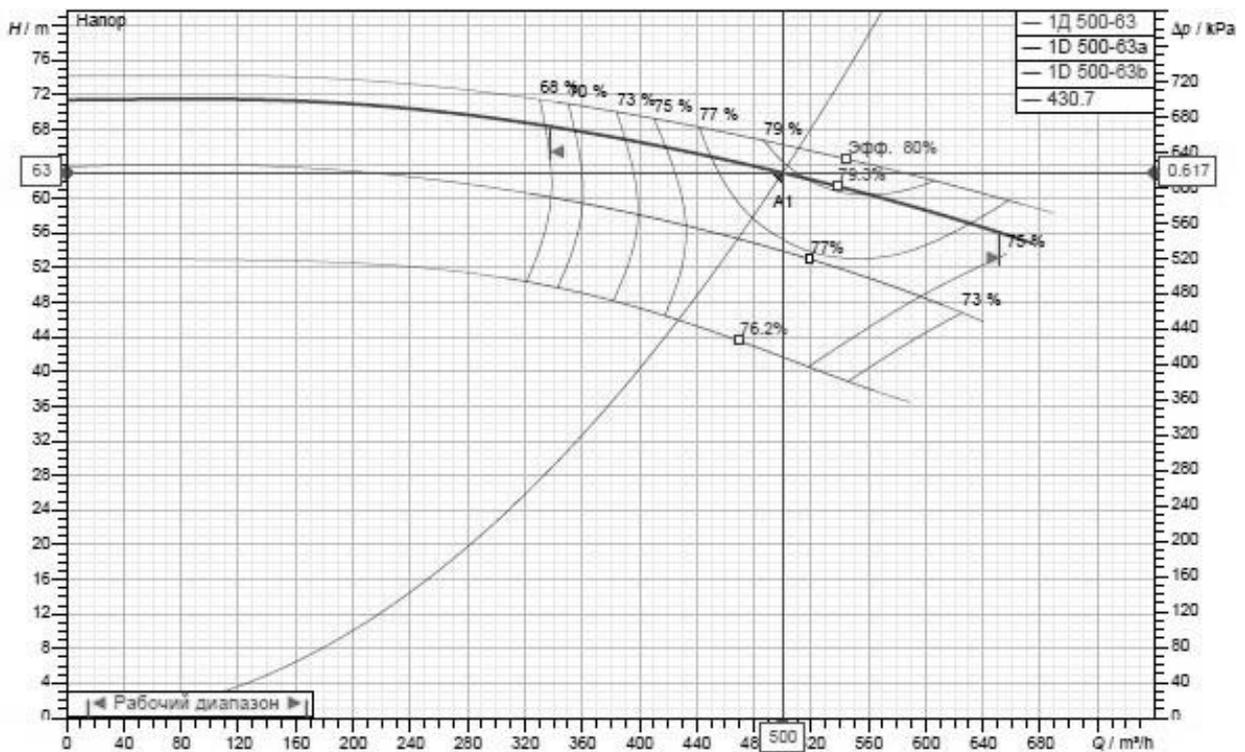


Рис. 2. Характеристика насоса 1Д500-63

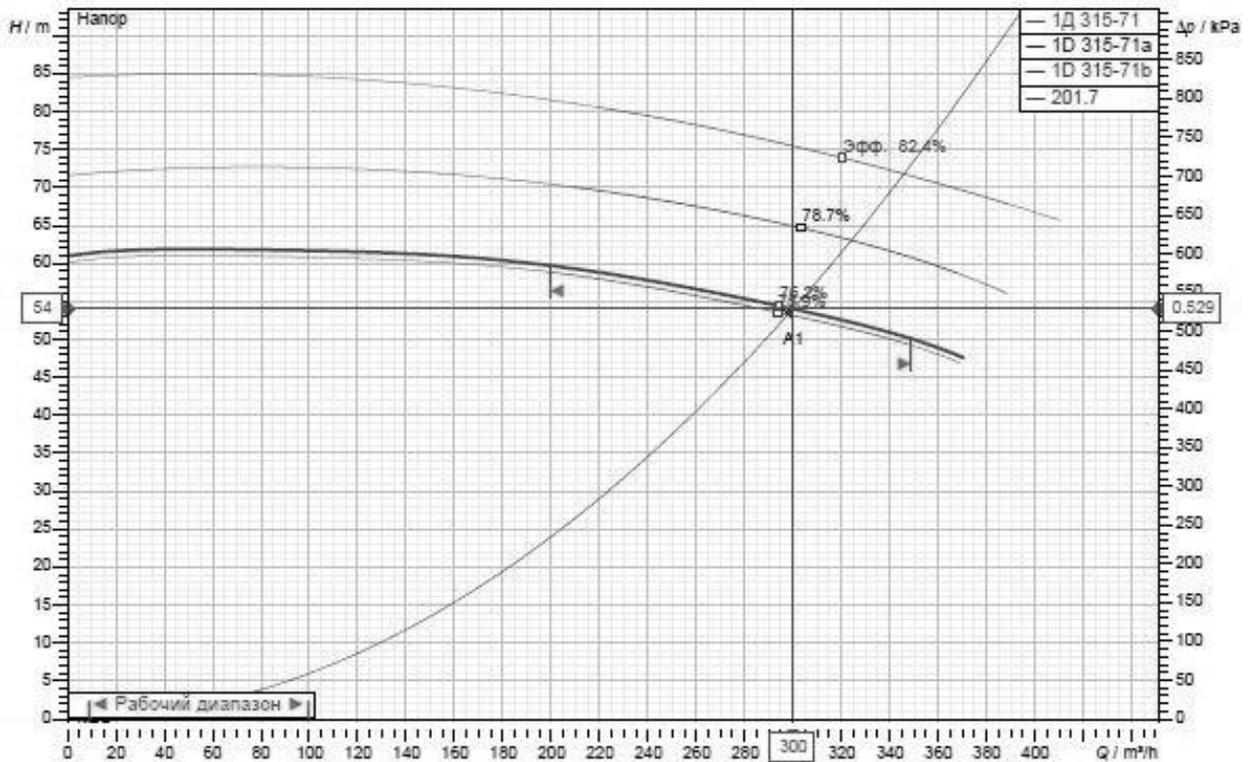


Рис. 3. Характеристика насоса 1Д315-71б

Предлагаем для упрощения выполняемых прочностных расчетов системы использовать типовой проект № 903-4-100.87 «Насосная станция тепловых сетей производительностью 5000 м³/ч с 3 насосами СЭ 2500-60-11 (вариант каркасно-панельный)», альбом III. В дальнейшем рекомендуем внести этот проект в базу типовых инженерных решений «СТАРТ-Проф 4.85», что позволит при выполнении аналогичных заданий не подбирать отдельные элементы прочностных характеристик системы, а использовать крупно узловую сборку.

Кроме того, рекомендуем добавить в данное инженерное решение новый способ обустройства трубопроводов подачи и возврата греющего теплового носителя, при котором трубы ГВС и трубы отопления размещаются в одном слое изоляции, а обратные трубопроводы обустраиваются отдельно. Считаем, что такая компоновка расширяет производственную линию двухтрубной системы, что может сэкономить затраты на исследования и разработку типовых инженерных систем. При этом снижается инвестиционный риск, возникающий из-за неправильного монтажа системы при выходе из строя одной трубы.

Кроме того, были рассмотрены и оценены тепловые потери при реальной эксплуа-

тации этого нового способа монтажа трубопроводов и предложены решения на основе теории конечно-элементного анализа.

На одном из чертежей указанного альбома показано, что нагнетательные и всасывающие линии трубопроводов поднимаются до отметки +6.370 по оси трубы от поверхности пола насосной. Таким образом, они образуют вертикальный П-образный компенсатор, снижающий нагрузки от теплового расширения на штуцера насоса [7, 8]. По существующей обвязке насосов нагнетательные и всасывающие трубопроводы не образуют компенсаторов. Скорректируем трассировку в соответствии с типовым проектом. В результате трубопроводы обвязки насосов поднимаются до отметки +2.800 (рис. 4).

После того как закончена предварительная обвязка оборудования, можно переходить к расчету на прочность проектируемой системы. Для этого создадим имитационную модель насосной аккумулирующих баков в программе «СТАРТ-Проф 4.85». Данная программа позволяет проводить сложные вычисления с большой точностью [9, 10]. Внешний вид модели с учетом предполагаемой трассировки и установки необходимой запорной и регулирующей арматуры приведен на рис. 5.

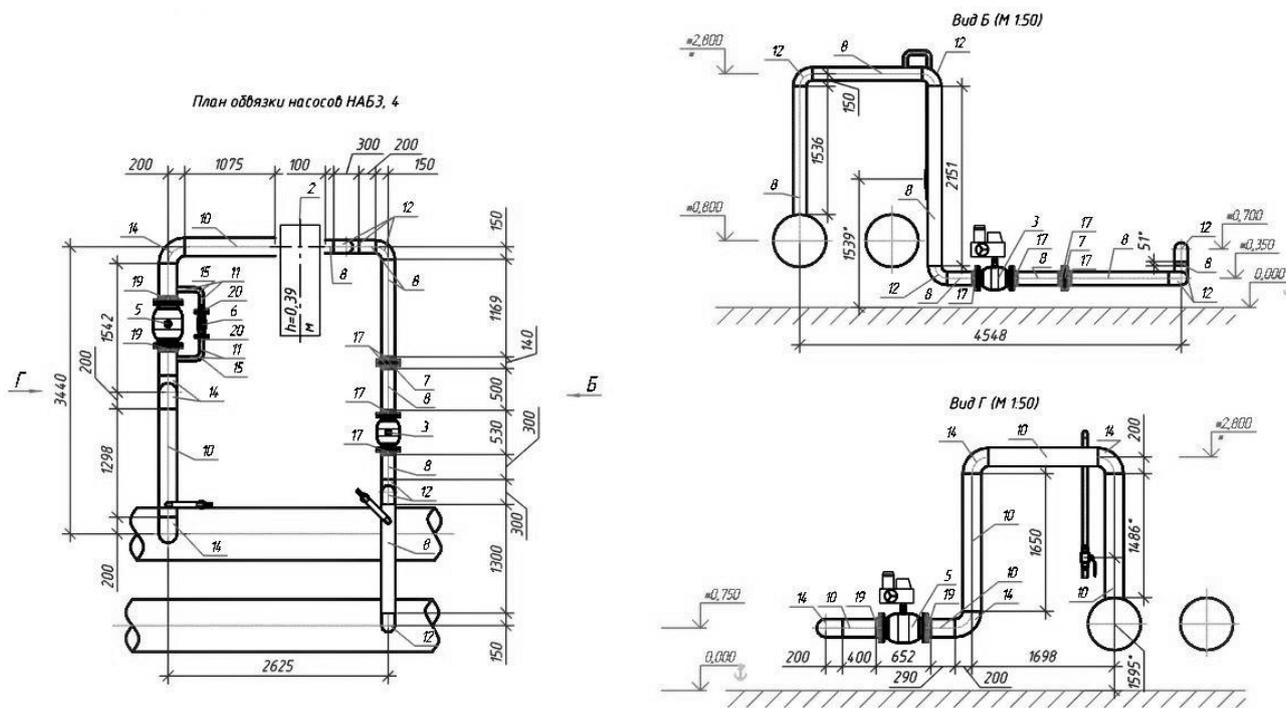


Рис. 4. Предполагаемая обвязка насоса 1Д315-716

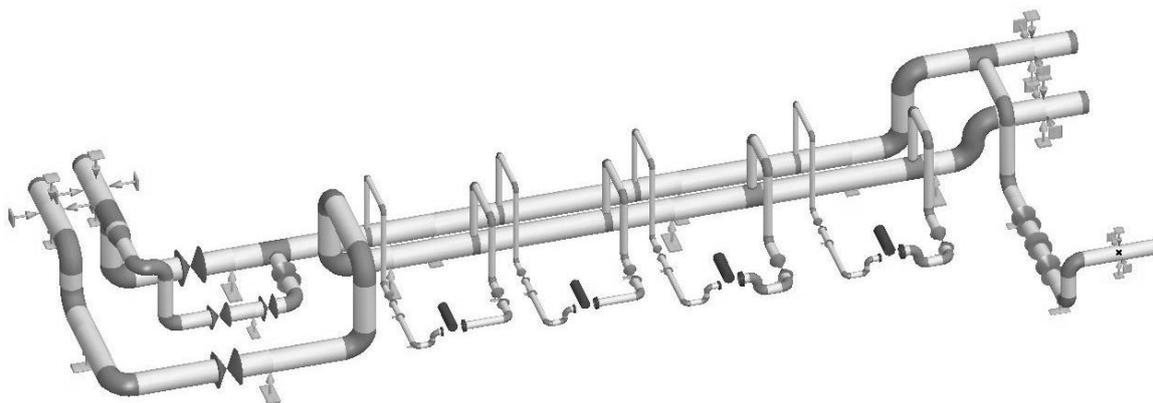


Рис. 5. Внешний вид имитационной модели насосной

При построении модели из библиотеки программы выбираем заложенные в спецификации трубы, отводы, тройники и переходы. Места прохода трубопровода через стену моделируем направляющими двусторонними опорами с заданным зазором. Для автоматического вычисления нагрузок на штуцера оборудования (в данном случае насосы) задаем их встроенным элементом программы. Можно моделировать каждый штуцер насоса мертвой опорой с заданной максимально возможной нагрузкой, но такой подход менее гибкий. При использовании встроенного инструмента есть возможность изменять коэффи-

циент перегрузки насосов. Допустимо принимать значения от 1 до 1,4. В данном случае при расчете принят коэффициент 1,2. По окончании построения запускаем расчет. Программа автоматически вычисляет температурные перемещения в каждой точке трубопровода, строит крайние положения (холодное и горячее состояние) системы. Также в отдельных окнах можно вывести нагрузки на элементы трубопровода (отводы, участки, тройники и т.д.), опоры или штуцера оборудования.

Если результаты расчета удовлетворительные, можно переходить к финальному этапу – формированию комплекта документации.

Результаты исследования. Основным результатом, определяющим работоспособность системы, в нашем случае являются нагрузки на оборудование. Они приведены на рис. 6.

Если нагрузка превышает допустимое значение, то в таблице (скриншот с экрана на рис. 6) на мониторе исполнителя происходит подсвечивание номера узла и численного значения нагрузки, превышающей

допустимое значение. В нашем расчете нагрузки в расчетных узлах соответствуют требованиям прочности, предъявляемым к трубопроводу и креплению запорной арматуры в виде штуцеров. Таким образом, можно сделать вывод о работоспособности предлагаемой системы обвязки. Это, в свою очередь, говорит о правильности разработанного подхода к проектированию теплогенерирующего объекта.

Элемент	Начальный конечный узел	Тип	DN,	Frad,	Fcir,	Flong,	FR,	Mrad,	Mcir,	Mlong,	MR,	Сум, %	Примечания
			мм	кгс	Fvert, кгс	Fshaft, кгс	кгс	кгс-см	Mvert, кгс-см	Mshaft, кгс-см	кгс-см		
Насос ГОСТ 54805/ISO 5199 НАБ2	Узел (85)	Всасывание, боковой	250	336.4	319.1	154.9	446.5	6798.92	12652.22	21001.83	24413.11	13.04	
				1002	810	894	1305	37800	43800	53400	65500		
	Узел (54)	Нагнетание, боковой	159	37.5	30.6	207.6	211	4406.56	10732.05	2228.2	11813.53	9.02	
Насос ГОСТ 54805/ISO 5199 НАБ3	Узел (76)	Всасывание, боковой	200	102.8	164.3	185.2	237.9	2137.79	10409.64	13286.62	15742.21	8.12	
				804	648	720	1045	27600	31800	39000	48000		
	Узел (45)	Нагнетание, боковой	159	44.3	21	222.6	227.9	3495.34	9033.17	2433.24	9840.22	8.00	
Насос ГОСТ 54805/ISO 5199 НАБ4	Узел (69)	Всасывание, боковой	200	106.6	164.3	192.7	247.2	2779.88	13719.59	12861.6	19009.88	10.48	
				804	648	720	1045	27600	31800	39000	48000		
	Узел (27)	Нагнетание, боковой	159	78.7	91.3	194.6	228.9	3250.99	7724.54	4023.74	8976.35	7.41	
Насос ГОСТ 54805/ISO 5199 НАБ1	Узел (93)	Всасывание, боковой	250	321.6	367	80.6	426.6	10936.7	24588.74	23036.56	34757.95	19.79	
				1002	810	894	1305	37800	43800	53400	65500		
	Узел (61)	Нагнетание, боковой	159	19.4	33.6	184	185.6	4490.55	9058.94	4112.05	10915.05	7.40	
				600	486	540	785	21000	24600	30000	36500		

Рис. 6. Нагрузки на штуцера оборудования по результатам расчета

Выводы. В результате реализации разработанной методики, предполагающей проектирование с использованием автоматизированных расчетов и ориентацией на типовое проектирование, сделан вывод о рациональности ее использования. Методика позволила получить удовлетворительные результаты без многократных изменений трассировки. Стоит отметить, что она не исключает вероятность допущения ошибки, так как расчет каждой конкретной системы зависит от множества параметров, таких как теплоноситель, материал труб, температура, давление, расстановка опор и другие.

Список литературы

1. **Пантелеев Ю.А.** Типовое проектирование. XXI // Жилищное строительство. – 2015. – № 5. – С. 76–77.
2. **Бочаров А.Ю.** Применение типовой проектной документации // МНИЖ. – 2016. – № 5-1(47). – С. 38–40.
3. **Николаев А.А.** Справочник проектировщика: Проектирование тепловых сетей. – М.: Книга по Требованию, 2017. – 359 с.

4. **Соколов В.Ю., Петрова Ю.А.** Особенности методик проектирования теплогенерирующих объектов // Научно-практический журнал «Энигма». – 2023. – № 56-1. – С. 33–41.

5. **Соколов В.Ю., Петрова Ю.А.** Корректировка методики проектирования насосной // Электронный сборник статей по материалам СХХVIII студенческой Междунар. науч.-практ. конф. «Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки». – 2023. – № 8(126). – С. 44–48.

6. **Головкова Ю.С., Иванов А.М., Сероченкова Е.А.** Подбор и расчет насосов, используемых в водоснабжении // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2019. – № 9. – С. 65–70.

7. **Клешнин Ю.А.** Сравнение различных компенсаторов температурных удлинений трубопроводов // Вестник науки. – 2020. – № 8(29). – С. 86–89.

8. **Кокорина О.М.** Анализ компенсационных устройств, применяемых в централизованном теплоснабжении // Молодой ученый. – 2018. – № 49(235). – С. 41–44.

9. **Тажигулов А., Шагабутдинов Д.И., Лукьянова И.Э.** Возможности использования сертифицированных программ для прочностного анализа работы технологических трубопроводов // Нефтегазовое дело. – 2021. – Т. 19, № 2. – С. 73–77.

10. Магалиф В.Я., Шапиро Е.Е. Программная система по расчету прочности и жесткости трубопроводов «СТАРТ» // CADmaster. – 2001. – № 3(08). – С. 35–37.

References

1. Panteleev, Yu.A. Tipovoe proektirovanie. XXI [Typical designing]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2015, no. 5, pp. 76–77.

2. Bocharov, A.Yu. Primenenie tipovoy proektnoy dokumentatsii [Application of standard project documentation]. *MNIZh*, 2016, no. 5-1(47), pp. 38–40.

3. Nikolaev, A.A. *Spravochnik proektirovshchika: Proektirovanie teplovykh setey* [Designer's guide: Design of thermal networks]. Moscow: Kniga po Trebovaniyu, 2017. 359 p.

4. Sokolov, V.Yu., Petrova, Yu.A. Osobennosti metodik proektirovaniya teplogeneriruyushchikh ob"ektov [Features of methods of designing heat generating facilities]. *Nauchno-prakticheskiy zhurnal «Enigma»*, 2023, no. 56-1, pp. 33–41.

5. Sokolov, V.Yu., Petrova, Yu.A. Korrek-tirovka metodiki proektirovaniya nasosnoy [Adjustment of the pumping station design methodology]. *Elektronnyy sbornik statey po materialam CXXVIII studencheskoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauchnoe soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Tekhnicheskie nauki»* [Electronic proceedings of materials of the CXXVIII

student International scientific-practical conference "Scientific community of students of the 21st century. Engineering science"], 2023, no. 8(126), pp. 44–48.

6. Golovkova, Yu.S., Ivanov, A.M., Serochenkova, E.A. Podbor i raschet nasosov, ispol'zuemykh v vodosnabzhenii [Selection and calculation of pumps used in water supply]. *Izvestiya TuIGU. Tekhnicheskie nauki*, 2019, no. 9, pp. 65–70.

7. Kleshnin, Yu.A. Sravnenie razlichnykh kompensatorov temperaturnykh udlineniy truboprovodov [Comparison of various compensators for temperature elongations of pipelines]. *Vestnik nauki*, 2020, no. 8(29), pp. 86–89.

8. Kokorina, O.M. Analiz kompensatsionnykh ustroystv, primenyaemykh v tsentralizovannom teplosnabzhenii [Analysis of compensation devices used in district heating]. *Molodoy uchenyy*, 2018, no. 49(235), pp. 41–44.

9. Tazhigulov, A., Shagabutdinov, D.I., Luk'yanova, I.E. Vozmozhnosti ispol'zovaniya sertifikatirovannykh programm dlya prochnostnogo analiza raboty tekhnologicheskikh truboprovodov [The possibilities of using certified programs for strength analysis of technological pipelines]. *Neftegazovoe delo*, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 73–77.

10. Magalif, V.Ya., Shapiro, E.E. Programmaya sistema po raschetu prochnosti i zhestkosti truboprovodov «СТАРТ» [Software system for calculating the strength and rigidity of pipelines "START"]. *CADmaster*, 2001, no. 3(08), pp. 35–37.

УДК 62.932.2

Ольга Борисовна Колибаба

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: koli-baba@mail.ru

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

Андрей Борисович Гаряев

ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет «МЭИ», доктор технических наук, профессор кафедры тепломассообменных процессов и установок, Россия, Москва, e-mail: gab874@yandex.ru

Разработка критериев оценки эффективности методов обращения с твердыми коммунальными отходами

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одной из наиболее социально значимых экологических проблем является проблема обращения с твердыми коммунальными отходами. В России наиболее распространенным методом обращения с отходами является их захоронение, то есть размещение на полигонах. Однако утилизация отходов таким способом не только не позволяет использовать их ресурсный потенциал, но и наносит вред окружающей среде. Наряду с данным методом используются и другие: рециклинг, сжигание, анаэробное сбраживание, термическая деструкция. Выбор того или иного метода обращения с отходами зависит от множества факторов: морфологического состава отходов, стоимости его реализации, суммарного воздействия на окружающую среду и т.д. В этой связи актуальным становится разработка комплексного критерия, позволяющего оценить эффективность применения конкретного метода обращения с отходами при заданных условиях.

Материалы и методы. Обоснование наиболее эффективного метода обращения с отходами, а также разработка комплексного критерия оценки эффективности выполнены с использованием метода анализа иерархий Т. Саати.

Результаты. Разработано шесть критериев, позволяющих оценить снижение объемов отходов, влияние процесса утилизации твердых коммунальных отходов на окружающую среду, объемы выбросов парниковых газов, энергетическую и экономическую привлекательность различных методов обращения с отходами. Предложен комплексный критерий, использование которого с привлечением экспертных оценок позволяет осуществить выбор метода утилизации твердых коммунальных отходов.

Выводы. В результате анализа полученных результатов установлено, что наиболее эффективным методом обращения с отходами является термическая деструкция, а захоронение отходов является менее предпочтительным, а также разработана методика для сопоставления и выбора способа утилизации твердых коммунальных отходов заданного состава на основе комплексного учета энергетических, экологических и экономических факторов.

Ключевые слова: метод анализа иерархий, твердые коммунальные отходы, захоронение коммунальных отходов, термическая деструкция, анаэробное сбраживание, рециклинг

Olga Borisovna Kolibaba

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor, Head of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: koli-baba@mail.ru

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

Andrey Borisovich Garyaev

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Heat and Mass Transfer Processes and Installations Department, Russia, Moscow, e-mail: gab874@yandex.ru

Development of criteria to evaluate effectiveness of solid municipal waste management methods

Abstract

Background. One of the most socially significant environmental problems is the problem of solid municipal waste (SMW) management. In Russia, the most common method of waste management is waste disposal, i.e., landfilling depositing. However, waste disposal in such a way prevents the use of their resource potential, and also, harms the environment. Along with this method, such methods as recycling, incineration, anaerobic digestion, and thermal destruction are used. The choice of a particular waste management method depends on many factors, for example the morphological composition of the waste, the cost of its implementation, the total impact on the environment, etc. Thus, development of a comprehensive criterion that allows evaluating the effectiveness of a specific waste management method under specified conditions is relevant.

Materials and methods. The substantiation of the most effective method of waste management, as well as the development of a comprehensive criterion for evaluating efficiency, is carried out using the method of analyzing hierarchies by T. Saati.

Results. Six criteria have been developed to assess the reduction of waste volume, the impact of the SMW recycling process on the environment, volume of greenhouse gas emissions, and the energy and economic attractiveness of various waste management methods. A comprehensive criterion has been proposed. The use of this criterion with the expert assessments makes it possible to choose a method for the disposal of SMW.

Conclusions. As a result of the analysis of the results obtained, it is found that the most effective method of waste management is thermal destruction, and waste disposal is less preferable. A method has been developed to compare and select a method for the disposal of SMW of a given composition based on a comprehensive account of energy, environmental and economic factors.

Key words: hierarchy analysis method, solid municipal waste, municipal waste disposal, thermal destruction, anaerobic digestion, recycling

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.020-028

Введение. Одной из актуальных проблем современности является утилизация и обезвреживание твердых коммунальных отходов (ТКО) [1–3].

С каждым годом объемы вывозимых ТКО интенсивно возрастают: за десятилетний период, с 2012 по 2021 годы, их количество увеличилось в 1,37 раза (с 255,8 до 349,5 млн м³)¹.

В соответствии с общепринятой концепцией обращения с ТКО, наилучшим вариантом является предотвращение их образования, затем следует повторное их использование, далее – переработка и другие формы утилизации, включая энергетическую утилизацию отходов, не подлежащих вторичной переработке. Замыкает список размещение на полигонах как последнее средство, от которого в перспективе планируется отказаться полностью [4].

В России основная масса ТКО размещается на полигонах, санкционированных и несанкционированных свалках. Исследованиями доказана экологическая опасность таких объектов, обусловленная эмиссиями загрязняющих веществ в окружающую

среду в период эксплуатации объектов и более интенсивными, залповыми выбросами токсичных веществ при пожарах [5, 6]. Кроме этого, данный способ обращения с ТКО не позволяет эффективно реализовать ресурсный потенциал отходов.

Главный вектор в решении проблемы утилизации отходов направлен на их вовлечение в повторное использование, т. е. рециклинг.

Существующие методы обращения с отходами и взаимосвязь между ними отражены на рис. 1.



Рис. 1. Методы обращения с отходами

На сегодняшний день на практике применяются более 30 технологий энергетической утилизации ТКО, которые реализуются

¹ Вывезено за год твердых коммунальных отходов // Единая межведомственная информационно-статистическая система: официальный сайт. – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/36702> (дата обращения 10.03.2024 г.).

на предприятиях Германии, Японии, Дании, США и других стран [7–10].

Анаэробное сбраживание является более предпочтительным по сравнению с полигонным захоронением. Однако данный метод может применяться только для органической составляющей ТКО, которая составляет менее 50 % от состава отходов².

Термическое обезвреживание ТКО является одним из наиболее распространенных способов обращения с отходами и включает в себя ряд технологий. Данные методы утилизации направлены на уменьшение объема отходов, их преобразование в безвредные материалы.

Наиболее распространенным методом термического обезвреживания является сжигание [13], основные преимущества которого заключаются в получении тепловой энергии, существенном сокращении объемов ТКО. Однако в ходе данного процесса в атмосферу выбрасываются токсичные вещества, что неблагоприятно сказывается на экологической обстановке в районах расположения мусоросжигательных заводов [14].

В качестве альтернативы прямому сжиганию можно рассматривать технологии термической деструкции, в частности пиролиз. Пиролитические методы позволяют уменьшить количество вредных выбросов, а также не требуют дорогостоящей подготовки топлива и приспособлены для переработки отходов различного состава.

В настоящее время не существует идеального решения, которое позволило бы наиболее эффективно и в максимальном объеме утилизировать ТКО без образования производственных отходов, выбросов вредных веществ в атмосферу и сбросов сточных вод. Все имеющиеся в настоящее время технологии обладают своими преимуществами и недостатками, так что при выборе способа утилизации ТКО следует максимально учитывать все существенные параметры.

Выбор метода утилизации ТКО определяется рядом факторов: стоимостью реализации технологии, воздействием на окружающую среду, возможностью полного или частичного использования ТКО для получения «полезных» продуктов и др. При этом

стоит отметить, что каждый из этих факторов в разной степени влияет на выбор метода утилизации.

Поскольку на текущий момент отсутствует система критериев, позволяющих осуществить комплексную оценку эффективности применения той или иной технологии утилизации ТКО, то задача их разработки является актуальной.

Методы исследования. Нами предлагается подход к решению проблемы выбора технологии утилизации ТКО, базирующийся на использовании некоего комплексного критерия, являющегося результатом экспертной оценки. Комплексный критерий оценки эффективности способов обращения с отходами может быть получен с использованием метода анализа иерархий (МАИ) Т. Саати [15]. Методология использования МАИ требует разработки иерархической структуры, включающей цели, основные критерии, ограничения, альтернативы. Схема модели МАИ приведена на рис. 2. На первом иерархическом уровне находится цель (в нашем случае – утилизация ТКО), которая ограничена рядом критериев, расположенных уровнем ниже. Нами предложено 6 критериев, которым далее будет присвоена количественная оценка, а сочетание данных критериев в итоге моделирования образует несколько альтернатив, способствующих принятию решения (третий иерархический уровень).

В качестве одного из основных показателей эффективности методов обращения с ТКО следует рассматривать сокращение их масс или объемов. В математическом выражении критерий снижения массы ТКО имеет вид

$$K_m = 1 - \frac{m_{\text{ост}}}{m_{\text{ТКО}}}, \quad (1)$$

где $m_{\text{ост}}$ – масса твердого (жидкого) остатка, полученного в результате переработки ТКО, кг; $m_{\text{ТКО}}$ – масса ТКО, кг.

Стоит отметить, что в случае, когда ТКО утилизируются путем их захоронения, численное значение данного критерия равно нулю, поскольку исходная масса ТКО не претерпевает никаких изменений.

² ИТС 15-2021 Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям «Утилизация и обезвреживание отходов (кроме термических способов)» // Бюро наилучших доступных технологий: официальный сайт. – URL: https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?Urllid=799&etkstructure_id=1872 (дата обращения 18.02.2024).

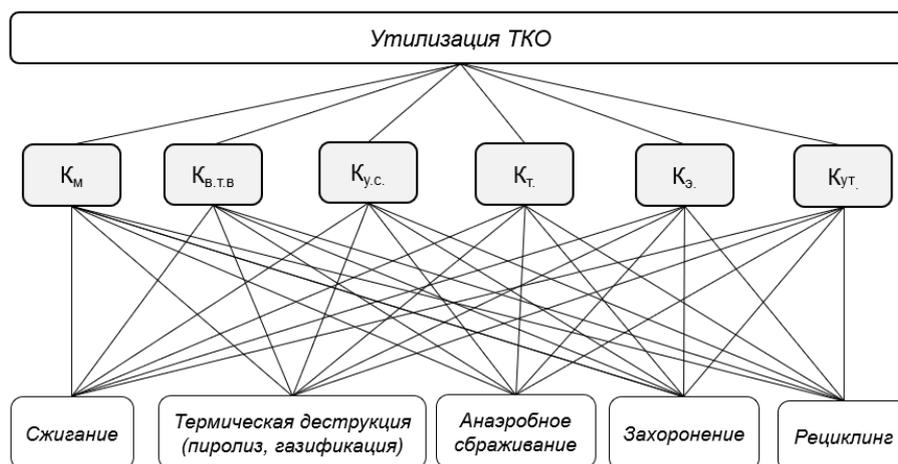


Рис. 2. Схема модели МАИ

Процесс рециклинга включает в себя повторное использование отходов по тому же назначению, а также возврат отходов после соответствующей обработки в производственный цикл [16]. При определении данного критерия для этого метода необходимо принимать во внимание, что не весь состав ТКО подвержен рециклингу. Анализируя морфологический состав ТКО (табл. 1)³, можно сделать вывод, что в рециклинге участвует не более 50 % от исходной массы ТКО.

Таблица 1. Усредненный морфологический состав ТКО

Компонент	Содержание компонентов ТКО по климатическим зонам, %		
	средняя зона	южная зона	северная зона
Пищевые отходы	30–37	37–45	29–36
Бумага, картон	37–41	23–32	26–36
Дерево	1–2	1–2	2–6
Черный металл	3–4	2–3	3–4
Цветной металл	1–2	1–2	1–2
Текстиль	3–5	3–5	4–6
Кости	1–2	1–2	1–2
Стекло	2–3	2–3	4–6
Кожа, резина	0,5–1	1	2–3
Камни	0,5–1	1	1–3
Пластмасса	5–6	5–6	5–6
Прочее	1–2	3–4	1–2
Отсев (менее 15 мм)	5–7	6–8	4–6

В результате термической деструкции, анаэробного сбраживания и сжигания образуется твердый (жидкий) остаток, поэтому полной утилизации исходной массы ТКО данными методами достичь не удастся, соответственно, значение этого критерия для них менее 1. Кроме этого, анаэробному сбраживанию подвергается не вся исходная масса ТКО, а только органическая ее часть, что также влияет на значение данного критерия.

При полном сжигании ТКО масса твердого остатка является его зольностью.

Не менее важным аспектом, которому стоит уделять внимание при обращении с ТКО, является воздействие на окружающую среду. В частности, это касается вредных опасных выбросов, которые образуются в результате обращения с ТКО. В этой связи возникает необходимость введения критерия, отражающего данные обстоятельства.

К токсичным веществам, содержащимся в ТКО, а также получаемым в результате их утилизации, следует относить токсичные органические соединения, в том числе диоксины, а также тяжелые металлы. Кроме того, при неполном сгорании могут попадать в атмосферу и канцерогенные вещества, такие как бенз(а)пирен.

Критерий количества опасных выбросов, образующихся в результате обращения с ТКО и загрязняющих атмосферный воздух, можно записать как

³ ИТС 15-2021 Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям «Утилизация и обезвреживание отходов (кроме термических способов)» // Бюро наилучших доступных технологий: официальный сайт. – URL: https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?Urllid=799&etkstructure_id=1872 (дата обращения 18.02.2024).

$$K_{\text{в.т.в}} = 1 - \frac{b_i \sum_{i=1}^n m_{\text{в.т.в},i}}{m_{\text{т.в}}}, \quad (2)$$

где $m_{\text{в.т.в},i}$ – масса выбросов i -го токсичного вещества, получаемого в результате обращения с ТКО и поступающего в атмосферу, кг; $m_{\text{т.в}}$ – масса токсичных веществ, содержащихся в ТКО, кг; b_i – коэффициент, отражающий степень опасности i -го вещества, который должен быть специальным образом определен (например, как величина, обратная классу опасности вещества).

При полном сжигании ТКО все присутствующие в исходной массе токсичные органические соединения переходят в окисленное состояние, что резко уменьшает их опасность, но часть опасных веществ в виде твердых частиц попадает в атмосферу.

Реализация различных методов обращения с ТКО сопровождается выбросами в атмосферу веществ, оказывающих влияние на климат. В качестве индикатора этого воздействия принято использовать «углеродный след», который определяется величиной выбросов парниковых газов.

При утилизации отходов часть углерода, содержащегося в исходной массе, окисляется в результате воздействия на ТКО и переходит в газообразное состояние. Данное соединение может оказывать негативное влияние на окружающую среду. Для количественной оценки этого показателя предложен критерий выбросов углерода в атмосферу:

$$K_{\text{у.с}} = 1 - \frac{m_{\text{т.к.о}} - m_{\text{угл.ост}}}{m_{\text{т.к.о}}}, \quad (3)$$

где $m_{\text{угл.ост}}$ – масса углерода в твердом или жидком углеродном остатке, полученном в результате обращения с ТКО, кг.

Данный критерий характеризует степень влияния термической переработки (сжигания и термической деструкции) на парниковый эффект. При сжигании происходит непосредственное выделение углеродсодержащих газов с образованием зольного остатка. А в результате термической деструкции образуется углеродный остаток и горючий газ, который в ходе последующего сжигания также приведет к образованию парниковых газов, негативно влияющих на климат.

В случае захоронения, термического воздействия на ТКО не происходит, поэтому величина этого критерия равна 1.

В сфере обращения с ТКО актуальными являются энергетические методы утилизации, позволяющие использовать отходы в качестве альтернативного топлива для производства тепловой и электрической энергии.

Для количественной оценки степени использования энергии, заключенной в ТКО, при применении того или иного метода утилизации можно применить следующий критерий:

$$K_{\text{т}} = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_{\text{с.н}}}{\mathcal{E}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{пол}}}{\mathcal{E}}, \quad (4)$$

где \mathcal{E} – энергия, полученная в результате переработки 1 тонны ТКО (топливо, тепловая и электрическая энергия), т у.т.; $\mathcal{E}_{\text{с.н}}$ – энергия, получаемая при переработке 1 тонны ТКО и используемая для поддержания процесса его переработки (собственные нужды установки), т у.т.; $\mathcal{E}_{\text{пол}}$ – полезная товарная энергия (топливо, тепловая и электрическая энергия), получаемая при переработке 1 тонны ТКО, т у.т.

При захоронении отходов заключенная в них энергия полезно не используется и $K_{\text{т}} = 0$. При сжигании ТКО вся исходная масса используется в качестве топлива. Если эта энергия не используется для получения пара или горячей воды, то $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{с.н}}$ и $K_{\text{т}} = 0$. Для других технологий значение $K_{\text{т}}$ может быть более нуля, но всегда менее 1.

Экономический аспект при выборе метода обращения с ТКО включает в себя затраты на его осуществление и потенциальную прибыль от реализации полезных продуктов переработки (тепловая и электрическая энергия, горючий газ, углеродный остаток).

Для корректного сравнения методов обращения с ТКО следует ввести критерий экономической привлекательности:

$$K_{\text{э}} = \frac{\Pi}{3}, \quad (5)$$

где Π – прибыль от продажи полезных продуктов переработки ТКО, тыс. руб.; 3 – затраты на осуществление процесса переработки ТКО, тыс. руб.

Основные финансовые затраты на реализацию различных методов обращения с ТКО приходятся на организацию раздельного сбора, предварительной подготовки и транспортировки ТКО, на приобретение не-

обходимого оборудования, а также включают затраты энергии (топлива) для осуществления процессов.

Для рециклинга получение прибыли осуществляется от реализации вторичного сырья – полимеров (пластика), макулатуры (бумаги и картона), стеклобоя (стекла). Доход от реализации вторичного сырья при достижении глубины переработки 60–75 % может составлять от 2,5 до 4,5 тыс. руб. на тонну отходов [18].

При анаэробном сбраживании ТКО потенциальный доход определяется возможностью сбыта получаемого биогаза, при термической деструкции – топливного газа, при сжигании – получаемой тепловой или электрической энергии.

Как было сказано выше, ряд существующих методов обращения с ТКО требует предварительной сортировки отходов, соответственно, обработке подвергается не вся масса ТКО, а лишь ее часть. Например, для осуществления пиролиза предварительно необходимо извлечь пластик.

Учет данный фактор позволяет применение критерия доли массы, удаляемой при переработке:

$$K_{\text{ут}} = \frac{m_{\text{ут}}}{m_{\text{исх.т.ко}}}, \quad (6)$$

где $m_{\text{ут}}$ – масса ТКО, пригодных для переработки, кг; $m_{\text{исх.т.ко}}$ – исходная масса ТКО, кг.

Результаты исследования. После разработки схемы модели МАИ (рис. 2) устанавливаются приоритеты критериев и оценивается каждая из альтернатив по критериям. В МАИ элементы задачи сравниваются попарно по отношению к их воздействию на общую для них характеристику. Система парных сравнений может быть представлена в виде обратносимметричной матрицы. Элементом матрицы $a(i,j)$ является интенсивность проявления элемента иерархии i относительно элемента иерархии j , оцениваемая по шкале интенсивности от 1 до 5, где:

- 1 – равная важность;
- 3 – умеренное превосходство;
- 5 – значительное превосходство.

На первом этапе были сформированы матрицы парных сравнений критериев на основе экспертных оценок. В табл. 2 приведены результаты парных сравнений критериев эффективности методов обращения с ТКО в соответствии с принятой шкалой.

На основе полученной матрицы был вычислен вектор весов критериев (ВВК) в следующей последовательности [15]:

1. Перемножали элементы каждой строки. Получили столбец.
2. Извлекали из полученных элементов корень, степень которого равна числу строк. Получили новый столбец.
3. Находили сумму элементов столбца.
4. Разделив на эту сумму каждый элемент, получили вектор приоритетов.

Таблица 2. Матрица парных сравнений критериев

	K_m	$K_{\text{в.т.в}}$	$K_{\text{у.с}}$	K_T	$K_э$	$K_{\text{ут}}$	ВВК
K_m	1	1	3	5	3	3	0,277
$K_{\text{в.т.в}}$	1	1	3	5	3	3	0,277
$K_{\text{у.с}}$	1/3	1/3	1	3	1	1	0,131
K_T	1/5	1/5	1/3	1	1	1	0,087
$K_э$	1/3	1/3	1	1	1	1	0,114
$K_{\text{ут}}$	1/3	1/3	1	1	1	1	0,114

Сравнивая оценки вектора приоритета, можно сделать вывод, что наибольшее значение при разработке критерия эффективности переработки ТКО придается в первую очередь критерию снижения объема ТКО K_m , а также критерию $K_{\text{в.т.в}}$, связанному с количеством токсичных вредных выбросов в окружающую среду, полученных в результате обращения с отходами.

С учетом полученных весовых коэффициентов выражение для определения комплексного критерия принимает вид

$$K = 0,277 \cdot K_m + 0,277 \cdot K_{\text{в.т.в.}} + 0,131 \cdot K_{\text{у.с.}} + 0,087 \cdot K_T + 0,114 \cdot K_э + 0,114 \cdot K_{\text{ут}}. \quad (7)$$

Далее, на втором этапе, аналогично были сформированы матрицы парных сравнений альтернатив для каждого критерия. Число матриц, соответственно, равно числу критериев (табл. 3).

На третьем этапе, используя рассчитанные весовые коэффициенты критериев для каждого метода в отдельности и весовые коэффициенты критериев, была составлена матрица «критерий – альтернатива». Перемножением полученной матрицы и вектора весов были вычислены коэффициенты предпочтения того или иного метода обращения с ТКО:

$$\begin{bmatrix}
 & K_M & K_{B.T.B} & K_{y.c} & K_T & K_3 & K_{yT} \\
 C & 0,344 & 0,054 & 0,077 & 0,463 & 0,077 & 0,328 \\
 TД & 0,344 & 0,344 & 0,231 & 0,195 & 0,385 & 0,215 \\
 AC & 0,129 & 0,344 & 0,231 & 0,195 & 0,385 & 0,065 \\
 З & 0,054 & 0,129 & 0,231 & 0,073 & 0,077 & 0,325 \\
 P & 0,129 & 0,129 & 0,231 & 0,073 & 0,077 & 0,065
 \end{bmatrix}
 \times
 \begin{bmatrix}
 0,277 \\
 0,277 \\
 0,131 \\
 0,087 \\
 0,114 \\
 0,114
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0,192 \\
 0,305 \\
 0,229 \\
 0,131 \\
 0,143
 \end{bmatrix}$$

Таблица 3. Матрица парных сравнений альтернатив

	С	ТД	АС	З	Р		С	ТД	АС	З	Р	С	ТД	АС	З	Р		
	K_M						$K_{B.T.B}$						$K_{y.c}$					
С	1	1	3	5	3	С	1	1/5	1/5	1/3	1/3	С	1	1/3	1/3	1/3	1/3	
ТД	1	1	3	5	3	ТД	5	1	1	3	3	ТД	3	1	1	1	1	
АС	1/3	1/3	1	3	1	АС	5	1	1	3	3	АС	3	1	1	1	1	
З	1/5	1/5	1/3	1	1/3	З	3	1/3	1/3	1	1	З	3	1	1	1	1	
Р	1/3	1/3	1	3	1	Р	3	1/3	1/3	1	1	Р	3	1	1	1	1	
	K_T						K_3						K_{yT}					
С	1	3	3	5	5	С	1	1/5	1/5	1	1	С	1	3	5	1	5	
ТД	1/3	1	1	3	3	ТД	5	1	1	5	5	ТД	1/3	1	3	3	3	
АС	1/3	1	1	3	3	АС	5	1	1	5	5	АС	1/3	1/3	1	1/5	1	
З	1/5	1/3	1/3	1	1	З	1	1/5	1/5	1	1	З	1	3	5	1	5	
Р	1/5	1/3	1/3	1	1	Р	1	1/5	1/5	1	1	Р	1/3	1/3	1	1/5	1	

Примечание. С – сжигание; ТД – термическая деструкция; АС – анаэробное сбраживание; З – захоронение; Р – рециклинг.

Анализируя полученные данные, стоит отметить, что методы термической деструкции ТКО являются предпочтительными, так как обладают наибольшим значением весового коэффициента, равного 0,305. Наименее привлекательным является захоронение.

Предлагаемый комплексный критерий является результатом нашей экспертной оценки для ТКО среднего состава. Соответственно, величины весовых коэффициентов могут быть другими в зависимости от обстоятельств и уровня принятия решений, например от состава отходов, существующей экологической обстановки, имеющихся в распоряжении финансовых средств и т.п. Нами предлагается форма и способ применения этого комплексного критерия.

Следует отметить, что предложенная группа основных критериев может быть расширена и дополнена при необходимости другими критериями, характеризующими, например, время утилизации ТКО, удельные энергозатраты на утилизацию 1 т ТКО и др.

Разработанный нами комплексный критерий может служить для поддержки принятия решений лицам, отвечающим за утилизацию твердых отходов на различных уровнях: корпоративном, отраслевом, муниципальном, региональном или федеральном. Он может применяться не только к коммунальным, но и к промышленным отходам.

Выводы. Предложенные 6 критериев, которые мы считаем основными, позволяют оценить снижение объемов отходов, влияние процесса утилизации ТКО на окружающую среду, объемы выбросов парниковых газов, энергетическую и экономическую привлекательность различных методов обращения с отходами.

Разработанный метод выбора способа утилизации ТКО заданного состава основан на комплексном учете энергетических, экологических и экономических факторов.

Список литературы

1. Шилкина С.В. Выбор стратегии управления твердыми коммунальными отходами для

решения проблем их утилизации // Отходы и ресурсы. – 2020. – Т. 7, № 4. – С. 1–17.

2. **Михайлова Н.В., Ясинская А.В.** Современные технологии энергетической утилизации ТКО // Экология и промышленность России. – 2020. – Т. 24, № 8. – С. 4–11.

3. **Современные полигоны ТКО** – отложенное на завтра решение проблемы переработки и утилизации отходов / Ю.А. Медовар, И.О. Юшманов, Е.Г. Хмельченко, М.А. Черкасова // Муниципальная академия. – 2022. – № 4. – С. 156–165.

4. **Голышева А.В., Семенцов С.П., Тиньков Н.Г.** Система обращения с ТКО: национальный проект «Экология» (Аналитический бюллетень «Актуальное в ESG-повестке»). – М., 2023. – 17 с.

5. **Ашихмина Т.В., Каверина Н.В., Куприенко П.С.** Анализ негативных экологических последствий эксплуатации полигона твердых коммунальных отходов г. Воронежа на разных этапах его жизненного цикла // Региональные геосистемы. – 2020. – Т. 44, № 3. – С. 343–358.

6. **Ашихмина Т.В., Жидова М.В.** Мониторинг пожарной опасности полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО) с учетом геоэкологических и медико-экологических аспектов // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 9. – С. 21–27.

7. **Трушникова К.А.** Мировые тренды в организации услуг по утилизации твердых коммунальных отходов // Развитие теории и практики управления социальными и экономическими системами: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2019. – С. 138–141.

8. **Poniatowska A., Kisiel M., Panasiuk D.** Municipal Waste Management in Poland Compared to Other European Union Countries // *Studia Ecologiae et Bioethicae*. – 2022. – Vol. 19, No. 4. – P. 85–95.

9. **Тугов А.Н.** Современные технологии термической переработки твердых коммунальных отходов и перспективы их реализации в России (обзор) // Теплоэнергетика. – 2021. – № 1. – С. 3–20.

10. **Овсянникова Д.К.** Зарубежный опыт обращения с отходами и возможность его применения в Российской Федерации // Муниципальная академия. – 2017. – № 3. – С. 78–82.

11. **Пиролитические** методы термической переработки твердых коммунальных отходов / В.В. Хасхачих, О.М. Ларина, Г.А. Сычев и др. // Теплофизика высоких температур. – 2021. – Т. 59, № 3. – С. 467–480.

12. **Гравдина П.Г.** Влияние развития строительства мусоросжигательных заводов в России на экологию // *E-Scio*. – 2020. – № 12(51). – С. 477–484.

13. **Саати Т.** Принятие решений: метод анализа иерархий / пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. – М.: Радио и связь, 1993. – 314 с.

14. **Наполов О.Б., Гришаева Ю.М.** Рециклинг ТКО: опыт разных стран // Вестник МНЭПУ. – 2021. – № S1. – С. 271–278.

15. **Тугов А.Н.** Энергетическая утилизация твердых коммунальных отходов на ТЭС. – М.: Открытое акционерное общество «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт», 2017. – 178 с.

16. **Мельникова Л.А.** Экономические аспекты переработки и использования твердых коммунальных отходов // Вопросы экономики и права. – 2023. – № 176. – С. 105–108.

References

1. Shilkina, S.V. Vybor strategii upravleniya tverdymi kommunal'nymi otkhodami dlya resheniya problem ikh utilizatsii [Choosing a solid municipal waste management strategy to solve the problems of their disposal]. *Otkhody i resursy*, 2020, vol. 7, no. 4, pp. 1–17.

2. Mikhaylova, N.V., Yasinskaya, A.V. Sovremennye tekhnologii energeticheskoy utilizatsii TKO [Modern technologies of energy utilization of MSW]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2020, vol. 24, no. 8, pp. 4–11.

3. Medovar, Yu.A., Yushmanov, I.O., Khmel'chenko, E.G., Cherkasova, M.A. Sovremennye poligony TKO – otlozhennoe na zavtra reshenie problema pererabotki i utilizatsii otkhodov [Modern landfills of MSW – a solution to the problem of waste processing and disposal postponed for tomorrow]. *Munitsipal'naya akademiya*, 2022, no. 4, pp. 156–165.

4. Golysheva, A.V., Sementsov, S.P., Tin'kov, N.G. *Sistema obrashcheniya s TKO: natsional'nyy proekt «Ekologiya» (Analiticheskiy byulleten' «Aktual'noe v ESG-povestke»)* [The system of handling MSW: national project “Ecology” (Analytical bulletin “Relevant in the ESG agenda”)]. Moscow, 2023. 17 p.

5. Ashikhmina, T.V., Kaverina, N.V., Kuprienko, P.S. Analiz negativnykh ekologicheskikh posledstviy ekspluatatsii poligona tverdykh kommunal'nykh otkhodov g. Voronezh na raznykh etapakh ego zhiznennogo tsikla [Analysis of the negative environmental consequences of the operation of the Voronezh municipal solid waste landfill at different stages of its life cycle]. *Regional'nye geosistemy*, 2020, vol. 44, no. 3, pp. 343–358.

6. Ashikhmina, T.V., Zhidova, M.V. Monitoring pozharnoy opasnosti polygonov tverdykh kommunal'nykh otkhodov (TKO) s uchetom geoekologicheskikh i mediko-ekologicheskikh aspektov [Monitoring of fire danger of landfills of solid municipal waste (MSW) taking into account geoecological and medico-ecological aspects]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2022, no. 9, pp. 21–27.

7. Trushnikova, K.A. Mirovye trendy v organizatsii uslug po utilizatsii tverdykh kommunal'nykh otkhodov [World trends in the organization of solid municipal waste disposal services]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy kon-*

ferentsii «Razvitie teorii i praktiki upravleniya sotsial'nymi i ekonomicheskimi sistemami» [Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference "Development of theory and practice of management of social and economic systems"]. Novokuznetsk, 2019, pp.138–141.

8. Poniatowska, A., Kisiel, M., Panasiuk, D. Municipal Waste Management in Poland Compared to Other European Union Countries. *Studia Ecologiae et Bioethicae*, 2022, vol. 19, no. 4, pp. 85–95.

9. Tugov, A.N. Sovremennye tekhnologii termicheskoy pererabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov i perspektivy ikh realizatsii v Rossii (obzor) [Modern technologies of thermal processing of municipal solid waste and prospects for their implementation in Russia (review)]. *Teploenergetika*, 2021, no. 1, pp. 3–20.

10. Ovsyannikova, D.K. Zarubezhnyy opyt obrashcheniya s otkhodami i vozmozhnost' ego primeneniya v Rossiyskoy Federatsii [Foreign experience in waste management and the possibility of its application in the Russian Federation]. *Munitsipal'naya akademiya*, 2017, no. 3, pp. 78–82.

11. Khaskhachikh, V.V., Larina, O.M., Sychev, G.A., Gerasimov, G.Ya., Zaychenko, V.M. Pirolyticheskie metody termicheskoy pererabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov [Pyrolytic methods of thermal processing of solid municipal waste].

Teplofizika vysokikh temperature, 2021, vol. 59, no. 3, pp. 467–480.

12. Gravdina, P.G. Vliyanie razvitiya stroitel'stva musoroszhigatel'nykh zavodov v Rossii na ekologiyu [The impact of the development of the construction of incinerators in Russia on the environment]. *E-Scio*, 2020, no. 12(51), pp. 477–484.

13. Saati, T. *Prinyatie resheniy: Metod analiza ierararkhiy* [Decision-making: A method for analyzing hierarchies]. Moscow: Radio i svyaz', 1993. 314 p.

14. Napolov, O.B., Grishaeva, Yu.M. Retsikling TKO: opyt raznykh stran [Recycling of MSW: the experience of different countries]. *Vestnik MNEPU*, 2021, no. S1, pp. 271–278.

15. Tugov, A.N. *Energeticheskaya utilizatsiya tverdykh kommunal'nykh otkhodov na TES* [Energy utilization of solid municipal waste at thermal power plants]. Moscow: Otkrytoe aktsionerное obshchestvo «Vserossiyskiy dvazhdy ordena Trudovogo Krasnogo Znameni Teplotekhnicheskiiy nauchno-issledovatel'skiy institut», 2017. 178 p.

16. Mel'nikova, L.A. Ekonomicheskie aspekty pererabotki i ispol'zovaniya tverdykh kommunal'nykh otkhodov [Economic aspects of processing and use of municipal solid waste]. *Voprosy ekonomiki i prava*, 2023, no. 176, pp. 105–108.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.316

Владимир Дмитриевич Лебедев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-04, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Денис Геннадьевич Григорьев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-04, e-mail: denis.grigorev@mail.ru

Анализ частотных характеристик токовых датчиков цифрового трансформатора тока и напряжения

Авторское резюме

Состояние вопроса. Источниками информации о процессах на современных цифровых подстанциях являются цифровые измерительные трансформаторы тока и напряжения, имеющие в своем составе различные датчики тока и напряжения. В качестве датчиков тока в цифровых измерительных трансформаторах тока и напряжения применяются классические малогабаритные трансформаторы тока, катушки Роговского, магнитотранзисторные датчики, датчики на эффекте Холла, волоконно-оптические датчики на эффекте Фарадея, а также шунты. В целях резервирования токовые каналы выполняются в нескольких экземплярах и на различных датчиках. Различные по своей природе датчики обладают определенным набором преимуществ, что в сумме позволяет получить эффект устранения недостатков конкретных датчиков. Так, например, они могут не иметь эффекта насыщения и довольно точно передавать постоянную составляющую тока, что является значительным преимуществом перед классическими трансформаторами тока. Поведение этих датчиков является довольно предсказуемым на частоте сети, однако их поведение на высших и низших частотах изучено недостаточно. В связи с этим необходимо исследовать АЧХ и ФЧХ данных датчиков в широком частотном диапазоне.

Материалы и методы. Для решения задач, поставленных в рамках данного исследования, использованы физический эксперимент, аналитические и эмпирические методы решения.

Результаты. Получены АЧХ и ФЧХ токовых датчиков цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения в широком частотном диапазоне. Спроектирован аналоговый фильтр для коррекции сигнала с магнитотранзисторного датчика.

Выводы. Полученные результаты совпадают с теоретическими данными и могут быть учтены при разработке цифровых алгоритмов РЗА.

Ключевые слова: частотные характеристики, измерительные трансформаторы тока, цифровые трансформаторы тока

Vladimir Dmitrievich Lebedev

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor, Head of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-04, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Denis Gennadievich Grigoriev

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-04, e-mail: denis.grigorev@mail.ru

Analysis of frequency-dependent characteristics of digital current and voltage transformer current sensors

Abstract

Background. Digital measuring current and voltage transformers (DCVT), which incorporate various current and voltage sensors are the key sources of information about processes at modern digital substations. Classic small-sized current transformers, Rogowski coils, magnetotransistor sensors, Hall effect sensors, fiber-optic Faraday effect sensors, as well as shunts can be used as current sensors in DCVTs. For redundancy purposes, current channels are performed in several copies and on different sensors. Sensors that are different in nature have their own set of advantages, which together makes it possible to obtain the effect of eliminating the shortcomings of specific sensors. For example, they may not have a saturation effect or transmit the direct current component quite accurately, which is a significant advantage over classic current transformers. At the mains frequency, the behavior of these sensors is predictable, but their behavior is not well studied at higher and lower frequencies. Thus, it is decided to study the frequency response and phase response of these sensors in a wide frequency range.

Materials and methods. To solve the problems within the framework of this study, physical experiment, analytical and empirical solution methods have been used.

Results. As a result of the study, the frequency response and phase response of current sensors of DCVT in a wide frequency range have been obtained. Analog filter has been designed to correct the signal of the magnetotransistor sensor.

Conclusions. The results obtained coincide with theoretical data and can be considered when developing digital relay protection and automation algorithms.

Key words: frequency characteristics, measuring current transformers, digital current transformers

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.029-038

Введение. Цифровые трансформаторы тока (ЦТТ) являются логическим продолжением развития классических трансформаторов тока с учетом внедрения цифровых технологий. В последнее время появляется все больше стандартов на ЦТТ¹, которые представляют собой переработанные стандарты для классических измерительных трансформаторов², но с учетом новых требований и условий. Так, напри-

мер, в стандарте³ присутствует требование к применению немагнитных сердечников у измерительных датчиков ЦТТ, что исключает применение классических трансформаторов тока (ТТ). Отсутствие намагничивания и гистерезиса сердечников приводит к отсутствию ряда проверок, присущих классическим ТТ.

В настоящее время в опытной эксплуатации на ПС Тобол находятся цифровые трансформаторы фирмы «Профотек», основанные на применении эффекта Фарадея, что является демонстрацией цифровизации электроэнергетического комплекса с применением современных цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения (ЦТТН). В рамках настоящего исследования были рассмотрены

¹ ГОСТ Р МЭК 60044-8-2010. Трансформаторы измерительные. Ч. 8. Электронные трансформаторы тока; СТО 34.01-3.2-017-2022. Цифровые трансформаторы тока 6–750 кВ. Общие технические условия. Стандарт организации.

² ГОСТ ИЕС 60044-1-2013. Трансформаторы измерительные. Ч. 1. Трансформаторы тока; ГОСТ Р МЭК 61869-2-2015. Трансформаторы измерительные. Ч. 2. Дополнительные требования к трансформаторам тока; ГОСТ 7746-2015. Трансформаторы тока. Общие технические условия.

³ СТО 34.01-3.2-017-2022. Цифровые трансформаторы тока 6–750 кВ. Общие технические условия. Стандарт организации.

другие виды датчиков для доказательства их пригодности и дальнейшего потенциального внедрения.

Одним из требований к измерительным преобразователям является наличие у них линейной АЧХ и ФЧХ. В релейной защите находят место защиты, реагирующие на высшие гармонические составляющие. Задача оценки качества электроэнергии так же требует измерения гармоник в широком частотном диапазоне, поэтому поиск новых линейных датчиков обусловлен рядом задач, для решения которых они будут полезны.

Переход на новые измерительные датчики, кроме вышеуказанных преимуществ, влечет за собой ряд проблем. В литературе можно найти упоминания АЧХ и ФЧХ классических ТТ и ТН в широком диапазоне частот [1, 2]. В отличие от них, новые преобразователи на данный момент не получили достаточного внимания из-за малой степени их внедрения в производство. Наличие в них еще не выявленных эффектов, которые искажают АЧХ или ФЧХ в ограниченной области частот, может приводить к неправильным измерениям, что недопустимо. Следовательно, появляется необходимость для изучения АЧХ и ФЧХ датчиков в целях доказательства предсказуемости их частотных характеристик.

В литературе имеются примеры измерения АЧХ и ФЧХ катушек Роговского (КР) [3–5] или указаны диапазоны линейности [6], а также АЧХ и ФЧХ делителя напряжения и системы «катушка Роговского + интегратор» [7], но информация о магнитотранзисторных датчиках (МТ) и датчиках на эффекте Холла (ДХ) отсутствует. Наличие данных по подобным датчикам позволит применять их для измерения электроэнергии и РЗиА, в связи с чем было принято решение провести исследования частотных характеристик датчиков.

Рассмотрим развитие теории практического применения цифровых измерительных трансформаторов тока, разработанных в ИГЭУ совместно с ООО НПО «ЦИТ». Датчиковая система цифрового измерительного трансформатора тока [8] упрощенно представлена на рис. 1 и состоит из классического трансформатора тока, катушки Роговского и магнитотранзисторного датчика. Последние два датчика не имеют эффекта насыщения, поэтому имеют хорошие перспективы применения для целей релейной защиты.

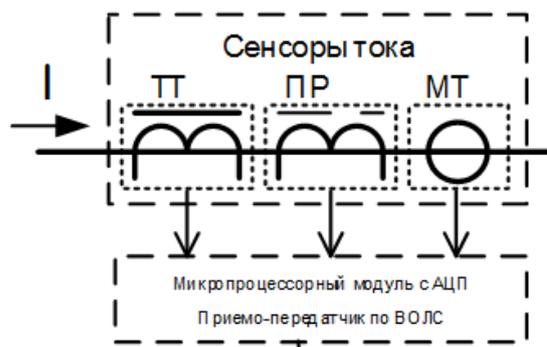


Рис. 1. Структура измерительной части цифрового трансформатора тока

Использование нескольких датчиков открывает перспективы создания новых алгоритмов обработки сигналов. Например, в [9] представлен алгоритм быстрого получения вектора сигнала при допущении об идеальности датчиков тока по шумовым и частотным характеристикам. В литературе имеются сведения о частотных свойствах классического трансформатора тока и катушки Роговского, применяемых в рассматриваемых образцах цифровых трансформаторов тока. Однако кроме вышеуказанных датчиков в ЦТТН используются специально разработанные малогабаритные датчики, частотные свойства которых необходимо исследовать.

Частотные свойства наматываемых датчиков тока (трансформатора тока и катушки Роговского) обусловлены наличием распределенных индуктивностей обмотки и межвитковых емкостей. Например, схема замещения электромагнитного трансформатора с емкостями [10] представлена на рис. 2, но в данной схеме для упрощения не показаны межвитковые емкости.

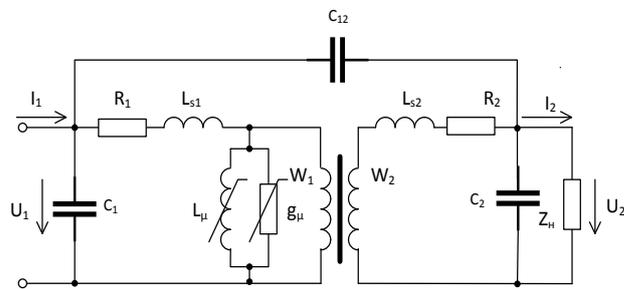


Рис. 2. Схема замещения электромагнитного трансформатора

Варианты схемы замещения обмотки катушки Роговского представлены на рис. 3.

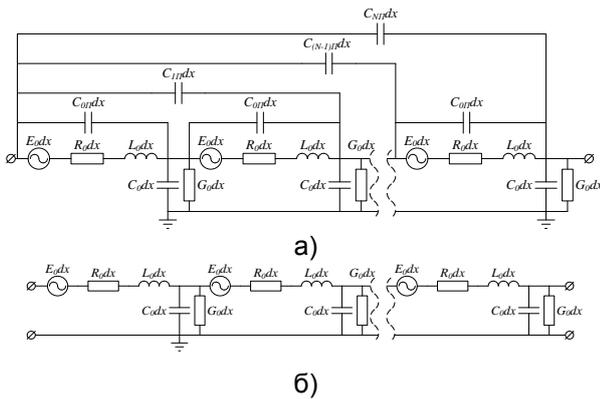


Рис. 3. Схемы замещения катушки Роговского: а – с продольными и межвитковыми емкостями и поперечными потерями; б – упрощенная схема замещения

Частотные зависимости трансформатора тока и катушки Роговского могут быть получены аналитическим методом, например для схемы рис. 3,б методом решения волнового уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = R_0 \left(G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \right) + L_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \right) -$$

$$-\frac{\partial E_0}{\partial x} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (R_0 C_0 + L_0 G_0) \frac{\partial u}{\partial t} +$$

$$+ R_0 G_0 u + \left(-\frac{\partial E_0}{\partial x} \right). \quad (1)$$

Следует отметить высокую сложность и трудоемкость определения параметров обмоточных датчиков и использования их в математических моделях, построенных на сложных математических зависимостях (например, уравнении (1)). Электронные датчики на основе магнитотранзисторов и датчиков Холла также обладают достаточной сложностью для получения расчетных параметров схем замещения для анализа частотных свойств.

Таким образом, было принято решение выполнить экспериментальные исследования первичных измерительных преобразователей цифрового трансформатора тока.

Испытательная установка и методика проведения эксперимента. При исследовании частотных характеристик датчиков тока возникает необходимость в поиске прецизионного источника тока и измерительного оборудования. От их выбора зависит достоверность результата. В качестве источника тока в данном эксперименте выступает связка программно-аппаратного комплекса системы модели-

рования реального времени (ПАК RTDS) и четырехквadrантного усилителя мощности Ponovo PAV5000. Согласно паспортным данным, выходная характеристика PAV5000 ограничена 5 кГц, однако в рамках выполненных экспериментов были получены сигналы тока с уменьшенной вплоть до частоты 50 кГц амплитудой. В качестве измерительного осциллографирующего оборудования были использованы приборы NI SCXI-1327/1600, Keysight 3458A и осциллограф Tektronix TBS2000. Основываясь на результатах предварительных экспериментов, был выбран осциллограф Tektronix TBS2000, имеющий наиболее приемлемую точность для данной задачи, а также прецизионный безындукционный шунт ШЭ-5,0 производства ООО «НПП Марс-Энерго» с номинальным током до 5 А и рабочим частотным диапазоном от 0 до 100 кГц. Определение АЧХ и ФЧХ происходит путем сравнения результатов с прецизионного шунта и измерительного датчика. Поскольку ток в 5 А является относительно малым по сравнению с номинальными токами исследуемых экспериментальных образцов датчиков тока, для нормировки сигнала при проведении экспериментов на датчики дополнительно наматывается первичная обмотка для доведения параметра ампер-витков до 450–550. Напряжение с прецизионного шунта конвертируется в ток с учетом числа ампер-витков на проверяемом датчике. Схема эксперимента представлена на рис. 4.

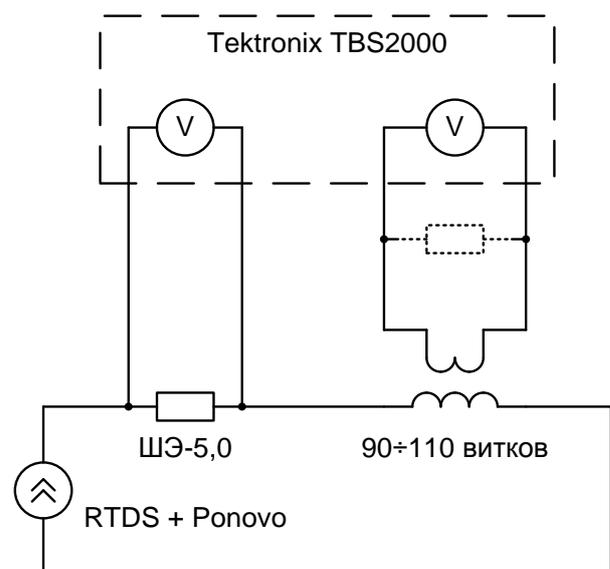


Рис. 4. Схема эксперимента

Для измерения были взяты следующие датчики: тороидальный малогабаритный ТТ, выполненный на сердечнике из аморфной стали; катушка Роговского; датчик на эффекте Холла; магнитотранзисторный датчик. При выполнении экспериментов были выбраны следующие частоты: от 1 до 9 герц с шагом 1 герц; от 10 до 90 герц с шагом 10 герц; от 100 до 900 герц с шагом 100 герц; от 1 до 9 кГц с шагом 1 кГц и от 10 до 50 кГц с шагом 5–10 кГц. Номинальные коэффициенты преобразования датчиков откалиброваны таким образом, чтобы на частоте 50 Гц значения с датчиков совпадали со значением тока, следовательно, АЧХ имело единичное значение. Поскольку амплитуда сигнала является неизменной, определение ФЧХ и АЧХ не представляет особого труда и производится по следующим выражениям:

$$A(f) = \frac{i_d(f)}{i_{ид}(f)} = \frac{k_d u_d(f)}{k_{ид} u_{ид}(f)};$$

$$\varphi_d(f) = \arccos\left(\frac{k_d u_d(f)}{I(f)}\right);$$

$$\varphi_{ид}(f) = \arccos\left(\frac{k_{ид} u_{ид}(f)}{I(f)}\right);$$

$$\varphi(f) = \varphi_d(f) - \varphi_{ид}(f),$$

где $A(f)$ – АЧХ; $i_d(f)$ – вторичный ток датчика; $i_{ид}(f)$ – вторичный ток идеального преобразователя; $k_d(f)$ – калибровочный коэффициент датчика; $k_{ид}(f)$ – калибровочный коэффициент идеального преобразователя; $u_d(f)$ – вторичное напряжение на датчике; $u_{ид}(f)$ – вторичное напряжение на идеальном преобразователе; $\varphi_d(f)$ – фаза датчика; $\varphi_{ид}(f)$ – фаза идеального преобразователя; $I(f)$ – амплитуда тока с усилителя; $\varphi(f)$ – ФЧХ.

Учитывая падение выходного сигнала, выдаваемого усилителем PAV5000,

которое наиболее выражено в диапазоне частот выше 5 кГц, погрешности при малых уровнях входных сигналов могут быть значительными, поэтому для проведения опыта были исследованы шумовые характеристики измерительного прибора – осциллографа. Измерения проводились для неподключенного к датчикам щупа осциллографа в различных временных диапазонах, а полученные результаты путем наложения были сведены на один график. Анализ полученных результатов измерения шумов (рис. 5) показывает, что уровень шумов в среднем не превышает 1,5 мВ и представляет собой квантованные значения нескольких начальных разрядов встроенного в осциллограф АЦП. В дальнейшем эти данные потребуются для оценки погрешности полученных данных.

Результаты измерений АЧХ и ФЧХ датчиков представлены на рис. 6. На представленных кривых зафиксированы предельные отклонения сигнала, которые могут быть вызваны недостаточной точностью измерений, наличием шумовой компоненты, представленной на рис. 5.

Анализируя полученные графики (рис. 6), можно сделать следующий вывод: ТТ является датчиком с линейной АЧХ и ФЧХ в диапазоне 5–50000 Гц. Таким образом, схему замещения трансформатора, изначально представленную на рис. 2, благодаря отсутствию заметного влияния паразитных емкостей и индуктивностей можно представить схемой, изображенной на рис. 7. Также при малых токах промышленной частоты в условиях отсутствия эффекта насыщения погрешность измерения трансформатора тока не превышает 0,1 %, поэтому трансформатор может рассматриваться как идеальный трансформатор, т.е. без ветви намагничивания L_m .

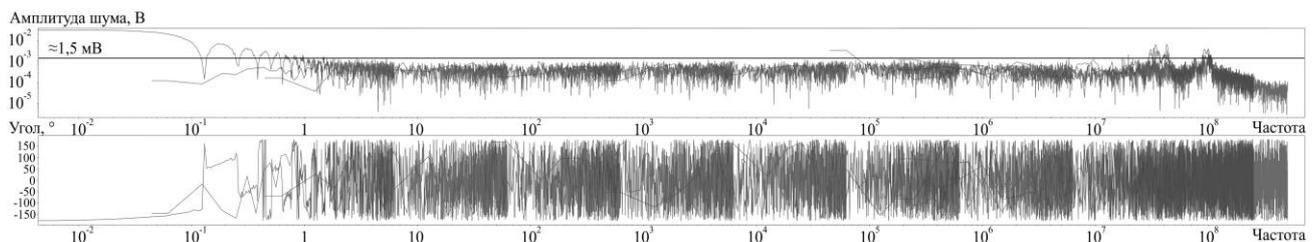


Рис. 5. Шумовая характеристика осциллографа

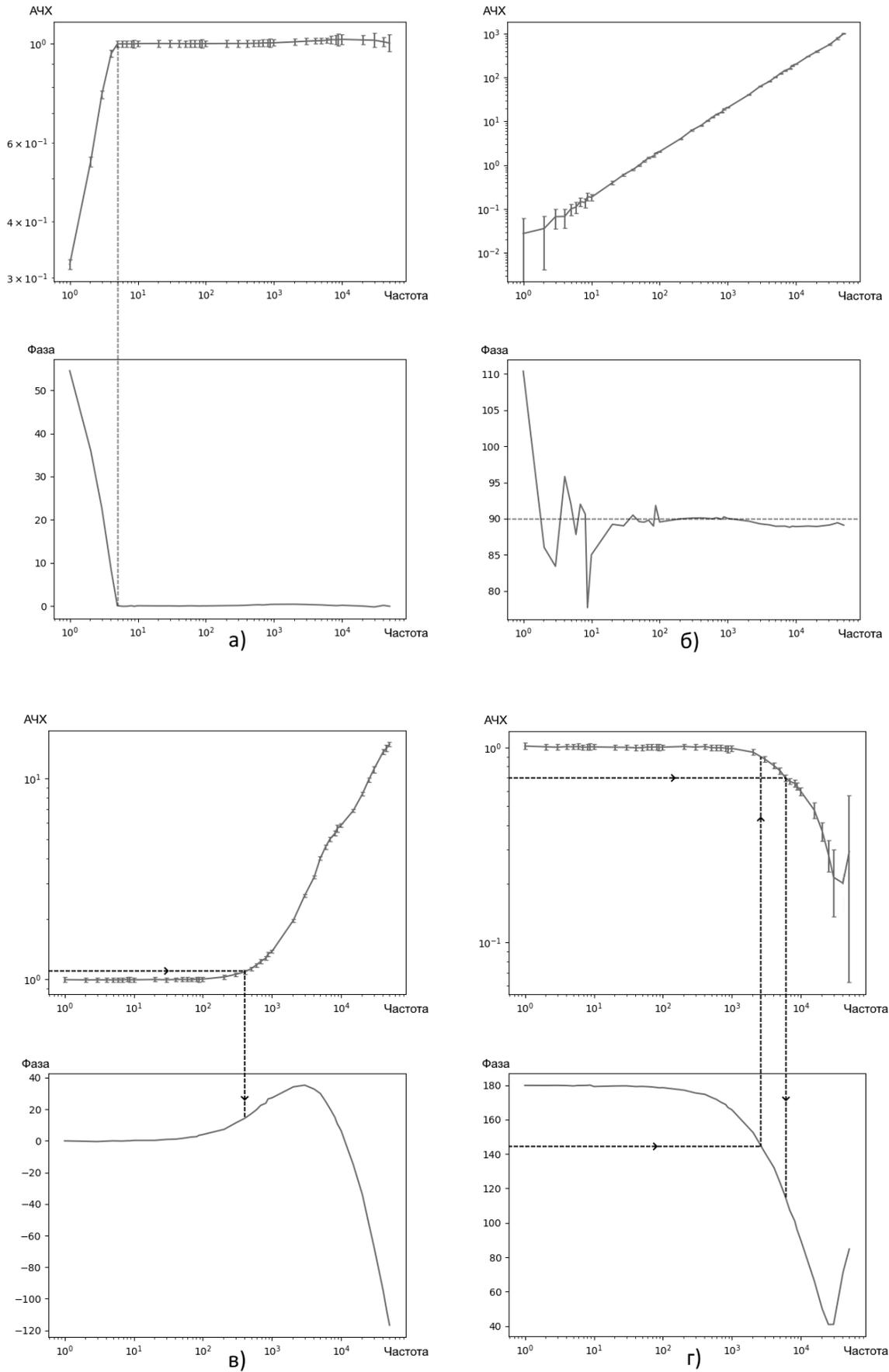


Рис. 6. АЧХ и ФЧХ ТТ (а), КР (б), МТ (в) и ДХ (г)

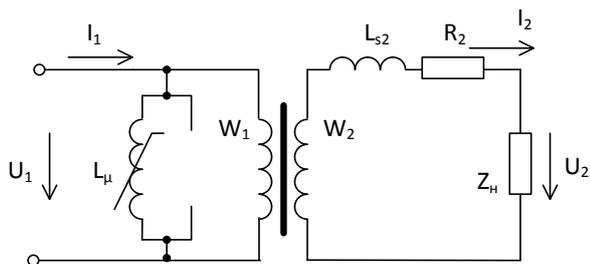


Рис. 7. Схема замещения электромагнитного трансформатора ЦТТ в частотном диапазоне от 5 до 50000 Гц.

АЧХ и ФЧХ КР демонстрируют линейный характер, но графики сильно зашумлены на низкой частоте по причине низкого выходного сигнала, сопоставимого с величиной шумовой компоненты измеряющего осциллографа. Измеренные на пониженных частотах осциллограммы имели четко выраженные ступени квантования в сигнале КР, а измерения собственных шумов осциллографа и шумов КР без подачи тока имеют такие же характерные ступени. Анализ схемы замещения КР (см. рис. 3) и результатов измерений, показанных на графиках (рис. 6,б) позволяет сделать вывод о том, что флуктуации, зафиксированные в области низких частот, не что иное, как цифровой шум осциллографа, или внешние наведенные сигналы, сопоставимые с уровнем шума. Наличие этих шумов и погрешности шкалы измерения (половина цены деления) учтено в столбчатых диаграммах ошибок на графике, поскольку избавиться от этих шумов не представляется возможным. Начиная с частоты 50 Гц, измеренные с помощью КР данные (рис. 6,б) демонстрируют линейный характер зависимости как по АЧХ, так и по ФЧХ. В области высоких частот отсутствуют нелинейности на частотных графиках, следовательно, на частотах до 50 кГц емкостные явления не вносят видимых искажений. На основании полученных данных схема замещения, представленная на рис. 3, может быть изменена и катушку Роговского можно представить схемой замещения с сосредоточенными параметрами для диапазона частот от 0 до 50000 Гц (рис. 8).

В случае, если КР нагружена на достаточно большое сопротивление (примерно > 10 кГц по опытным данным для конкретной КР), собственные сопротивление и индуктивность КР не будут вносить значительного влияния на измерения, следова-

тельно, при таких допущениях, КР можно представить как источник ЭДС.

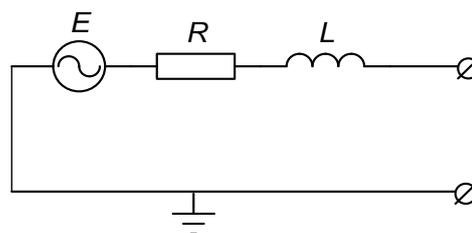


Рис. 8. Упрощенная схема замещения катушки Роговского

Особый интерес представляет АЧХ магнитотранзистора. В структуре МТ датчика находятся сами магнитотранзисторы и усилительные каскады на операционных усилителях. Также следует отметить, что в усилительном каскаде отсутствуют интегрирующие и дифференцирующие цепочки. Анализ теоретических и экспериментальных данных по работе усилительных каскадов говорит о снижении амплитуды сигнала с ростом повышения частоты. Данный эффект приводит к необходимости моделирования их характеристик запаздывающими звеньями первого или второго порядков [11]. МТ имеет АЧХ, похожую на инверсную АЧХ фильтра нижних частот (ФНЧ), усиливая ВЧ-сигналы в зависимости от их частоты и пропускающая НЧ-сигналы неизменными. ФЧХ МТ имеет характеристику с перегибом, когда угол сначала опережает измеряемый ток, а затем начинает отставать. Уникальные свойства поведения АЧХ и ФЧХ продиктованы поведением носителей заряда в полупроводниковой структуре магнитотранзистора в рассматриваемом частотном диапазоне, в частности структура МТ содержит несколько областей пространственного заряда с емкостными свойствами и эффектами, влияющими на время жизни неосновных носителей заряда.

В целях коррекции частотных характеристик, логичным решением будет применить ФНЧ, поскольку в таком случае получим линейную АЧХ и сглаженную ФЧХ. Для МТ можно определить величину, схожую по смыслу с частотой среза у фильтров, но обратную ей – частоту, при которой амплитуда вырастает в $\sqrt{2}$ раз. Согласно рис. 6,в, эта частота составляет примерно 400 Гц.

АЧХ и ФЧХ ДХ очень схожи с соответствующими АЧХ и ФЧХ у ФНЧ, за исключением того факта, что у них не совпадают частоты среза, вычисленные по соответствующим выражениям. По условию уменьшения амплитуды в $\sqrt{2}$ раз по АЧХ, частота среза у ДХ равна примерно 2,7 кГц, в то время как по условию уменьшения угла на 45 градусов по ФЧХ частота среза равна примерно 6 кГц.

Выбор ФНЧ для МТ. Для выбора частоты среза фильтра было проведено численное моделирование фильтра. АЧХ и ФЧХ ФНЧ можно описать следующей системой уравнений:

$$A(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{f^2}{f_{cp}^2}}}; \quad (3)$$

$$\varphi(f) = -\arctg\left(\frac{f}{f_{cp}}\right),$$

где f – частота; f_{cp} – частота среза.

Умножив соответствующие значения АЧХ датчика и АЧХ фильтра, можно получить предполагаемую АЧХ датчика с фильтром. При подстановке ранее рассчитанной частоты 400 Гц в уравнение фильтра, итоговые АЧХ и ФЧХ имеют большой уклон в сторону АЧХ ФНЧ. Для выравнивания характеристик необходима частота среза выше расчетной. Итеративным путем была выбрана частота 2 кГц. Полученные АЧХ и ФЧХ изображены на рис. 9.

При данной настройке фильтра АЧХ имеет линейность с погрешностью $\pm 10\%$ до частот примерно 11–12 кГц, а ФЧХ достигает -45 градусов на частотах 5–6 кГц. По полученным на модели данным был собран аналоговый фильтр на RC-цепочке. Полученные АЧХ и ФЧХ изображены на рис. 10. Их анализ показывает, что аналоговый фильтр попадает в диапазон 10 %-ной погрешности АЧХ до частоты примерно 9 кГц, в то время как фаза пересекает границу в -45 градусов на частоте 5 кГц. Данная настройка фильтров позволяет получить удовлетворительные значения АЧХ ценой ухудшения ФЧХ по сравнению с исходными (рис. 6, в). Следовательно, магнитотранзисторный датчик с фильтром может найти применение для измерений частот вплоть до 2 кГц (до 40-й гармоники в сетях 50 Гц).

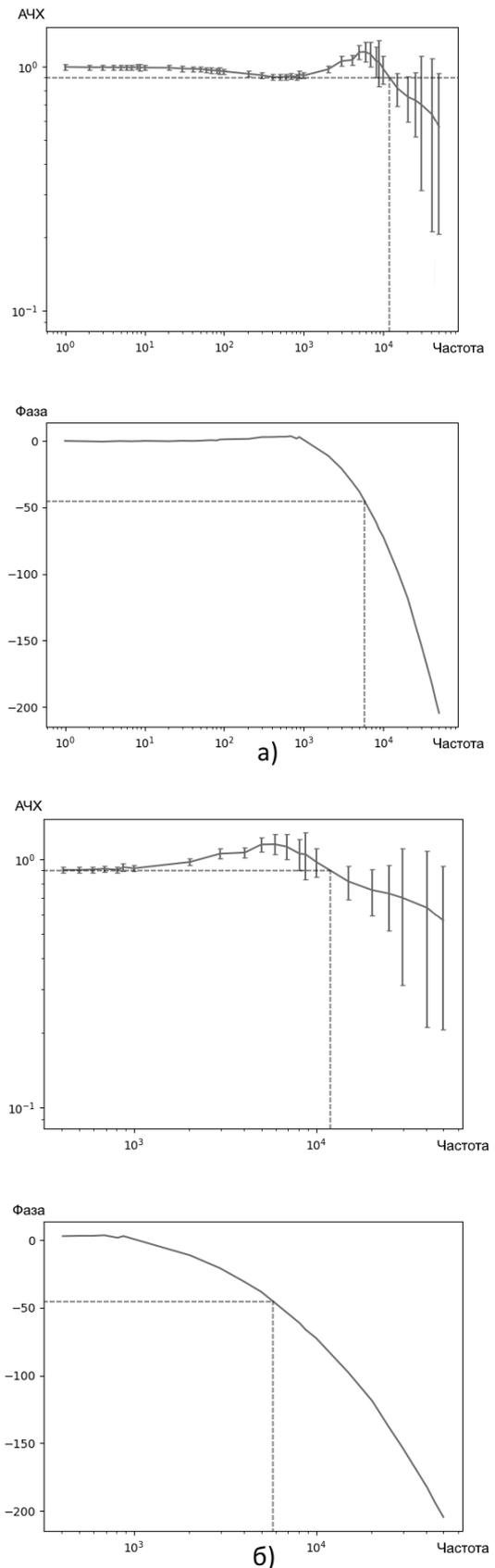


Рис. 9. АЧХ и ФЧХ МТ с цифровым ФНЧ по всему измеряемому диапазону (а) и в диапазоне 400–50000 Гц (б)

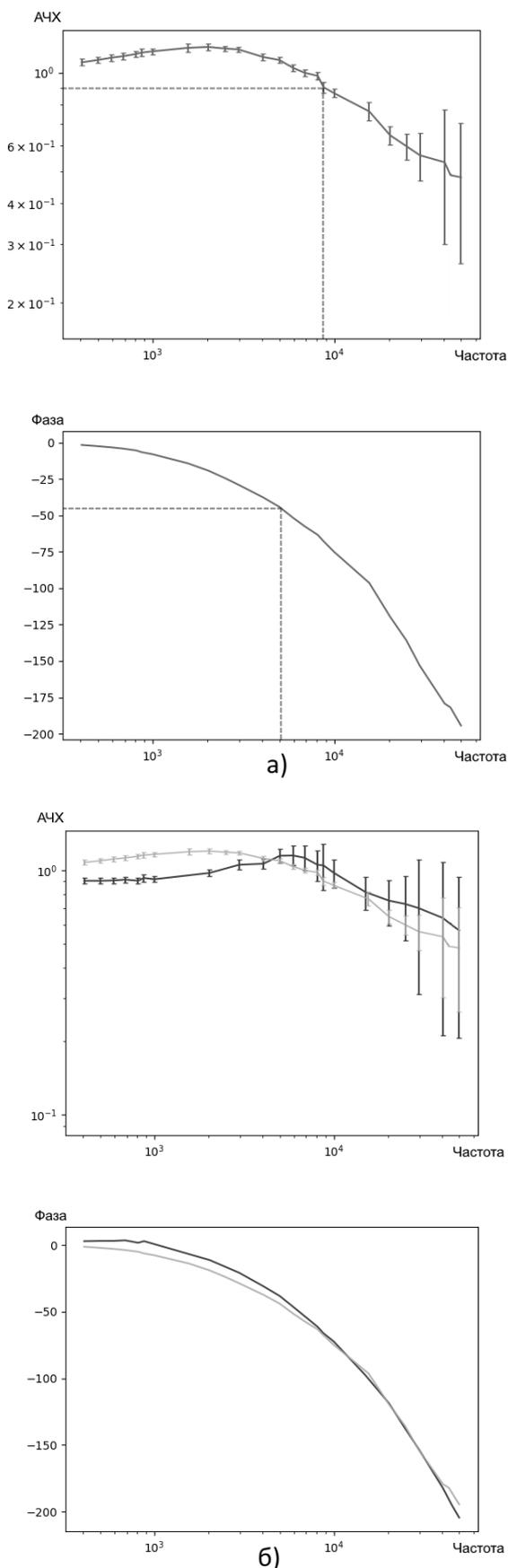


Рис. 10. АЧХ и ФЧХ МТ с аналоговым ФНЧ в диапазоне 400–50000 Гц (а) и сравнение аналогового (светлый график) и цифрового (темный график) фильтров (б)

Выводы. Несмотря на исключительную линейность ТТ в заданном диапазоне частот, разумным выбором будут являться КР и МТ-датчик, поскольку они имеют широкий амплитудный диапазон с отсутствием насыщения. Катушка Роговского пригодна к применению как датчик производной тока в своем первоначальном виде, в то время как магнитотранзисторный датчик пригоден к применению в качестве измерителя непосредственного значения тока только после выбора соответствующего ФНЧ.

В результате экспериментов показана возможность применения четырех датчиков тока для измерений в ЦТТ. ТТ и КР имеют линейные АЧХ и ФЧХ, поэтому могут быть применены практически во всех случаях. Линейность АЧХ и ФЧХ датчика Холла ограничена частотой 2 кГц, что ограничивает его применение для измерений гармонического состава токов в сети. АЧХ и ФЧХ МТ-датчика после фильтрации ограничены частотой 5 кГц, что позволяет измерять гармоники в приемлемом диапазоне для целей РЗА. В настоящем исследовании не рассматривалось влияние изменения тока на АЧХ, а также рассматривался всего один датчик каждого вида. Анализ этих факторов станет темой дальнейших исследований.

Список литературы

1. Draxler K., Styblikova R. Using instrument transformers in a wider frequency range // 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. – Hangzhou, China, 2011. – P. 1–4. DOI: 10.1109/IMTC.2011.5944298.
2. Frequency response of Measurement Current Transformers / A. Cataliotti, D. Di Cara, P.A. Di Franco, et al. // 2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. – Victoria, BC, Canada, 2008. – P. 1254–1258. DOI: 10.1109/IMTC.2008.4547234.
3. Вопросы применения цифровых трансформаторов тока на основе катушки Роговского для ЦПС / Р.С. Плакидин, Д.Н. Ульянов, Е.И. Хромцов и др. // Междунар. науч.-техн. конф. «Релейная защита и автоматика энергосистем – 2023», г. Сочи. – URL: https://enip2.ru/Publication/rza_23_es_6.3_1_RRC_06_plakidin.pdf (дата обращения: 18.04.2024)
4. Development of the test platform for the characteristics of the Rogowski coil electronic current transformer / Y. Chen, Q. Huang, S. Jing, et al. // 2016 International Conference on Smart

Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE). – Chengdu, China, 2016. – P. 278–283. DOI: 10.1109/ICSGCE.2016.7876069.

5. **Investigation** on anti-interference of Rogowski coil current transformers in smart substations / J. Ji, Y. Yuan, F. Pang, Y. Zheng // 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). – Beijing, China, 2017. – P. 1–6. DOI: 10.1109/EI2.2017.8245234.

6. **Гречухин В.Н.** Электронные трансформаторы тока и напряжения. Состояние, перспективы развития и внедрения на ОРУ 110–750 кВ станций и подстанций энергосистем // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. – С. 35–42.

7. **Hrabcik M., Javora R., Prokop V.** Low-power Instrument Transformers Frequency Response and Accuracy Requirements for Harmonics // Proc. of the 25th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2019). – Madrid, Spain, 2019. DOI: 10.34890/579.

8. **Пат.** на полезную модель № 174411 U1 Российская Федерация, МПК G01R 19/00, G01R 27/08. Цифровой трансформатор тока и напряжения / В.Д. Лебедев, А.А. Яблоков, Д.А. Лебедев и др.; № 2017112539; заявл. 12.04.2017; заявитель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное объединение «Цифровые измерительные трансформаторы»; опубл. 12.10.2017.

9. **Лебедев В.Д., Григорьев Д.Г.** Разработка и исследование подхода к обработке сигналов цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения // Вестник ИГЭУ. – 2024. – Вып. 2. – С. 32–48. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.032-048

10. **Стародубцев Ю.Н.** Теория и расчет трансформаторов малой мощности. – М.: ИП РадиоСофт, 2005. – 320 с.

11. **Хоровиц П., Хилл У.** Искусство схемотехники: в 3 т. Т. 1: пер. с англ. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Мир, 1993. – 413 с.

References

1. Draxler, K., Styblikova, R. Using instrument transformers in a wider frequency range. 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Hangzhou, China, 2011, pp. 1–4. DOI: 10.1109/IMTC.2011.5944298.

2. Cataliotti, A., Di Cara, D., Di Franco, P.A., Emanuel, A.E., Nuccio, S. Frequency response of Measurement Current Transformers. 2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Victoria, BC, Canada, 2008, pp. 1254–1258. DOI: 10.1109/IMTC.2008.4547234.

3. Plakidin, R.S., Ul'yanov, D.N., Khromtsov, E.I., Andreev, P.I., Mokeev, A.V. Voprosy primeneniya tsifrovyykh transformatorov toka

na osnove katushki Rogovskogo dlya TsPS [Issues of using digital current transformers based on Rogowski coils for digital substations]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Releynaya zashchita i avtomatika energosistem – 2023»* [International scientific and technical conference “Relay protection and automation of power systems – 2023”]. Sochi, 2023. Available at: https://enip2.ru/Publication/rza_23_es_6.3_1_RRC_06_plakidin.pdf (accessed 18.04.2024)

4. Chen, Y., Huang, Q., Jing, S., Mo, C., Zhen, W., Wu, J. Development of the test platform for the characteristics of the Rogowski coil electronic current transformer. 2016 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE). Chengdu, China, 2016, pp. 278–283. DOI: 10.1109/ICSGCE.2016.7876069.

5. Ji, J., Yuan, Y., Pang, F., Zheng, Y. Investigation on anti-interference of Rogowski coil current transformers in smart substations. 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China, 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/EI2.2017.8245234.

6. Grechukhin, V.N. Elektronnyye transformatory toka i napryazheniya. Sostoyaniye, perspektivy razvitiya i vnedreniya na ORU 110–750 kV stantsiy i podstantsiy energosistem [Electronic current and voltage transformers. Status, prospects for development and implementation at outdoor switchgear 110–750 kV stations and substations of power systems]. *Vestnik IGEU*, 2006, issue 4, pp. 35–42.

7. Hrabcik, M., Javora, R., Prokop, V. Low-power Instrument Transformers Frequency Response and Accuracy Requirements for Harmonics. Proc. of the 25th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2019). Madrid, Spain, 2019. DOI: 10.34890/579.

8. Lebedev, V.D., Yablokov, A.A., Lebedev, D.A., Naumov, A.V., Mironov, S.V. *Tsifrovoy transformator toka i napryazheniya* [Digital current and voltage transformer]. Patent RF, no. 174411, 2017.

9. Lebedev, V.D., Grigor'ev, D.G. Razrabotka i issledovanie podkhoda k obrabotke signalov tsifrovyykh izmeritel'nykh transformatorov toka i napryazheniya [Development and research of an approach to signal processing of digital instrument current and voltage transformers]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 2, pp. 32–48. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.032-048.

10. Starodubtsev, Yu.N. *Teoriya i raschet transformatorov maloy moshchnosti* [Theory and calculation of small power transformers]. Moscow: IP RadioSoft, 2005. 320 p.

11. Khorovits, P., Khill, U. *Iskusstvo skhemotekhniki: v 3 t., t. 1* [The Art of Electronics: in 3 vols., vol. 1]. Moscow: Mir, 1993. 413 p.

УДК 621.311

Валерий Павлович Голов

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

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@es.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

Сравнение характеристик линий высокого и сверхвысокого напряжений при выборе параметров управляемого устройства продольной компенсации

Авторское резюме

Состояние вопроса. Применение устройств продольной компенсации приводит к увеличению пропускной способности линии электропередачи. Однако это повышает и опасность возникновения колебательного нарушения устойчивости электроэнергетической системы. Самораскачивание и самовозбуждение системы наблюдается в системах с регулируемым устройством продольной компенсации с высокой степенью емкостной компенсации. Известно, что автоматическое регулирование возбуждения генераторов частично устраняет отрицательное действие продольной емкостной компенсации на колебательную статическую устойчивость. Следовательно, при выборе настроечных параметров регулируемых устройств необходимо учитывать их совместное влияние на режимы системы. Разработанные методики исследования статической устойчивости позволяют анализировать режимы энергосистем с управляемой электропередачей различных классов напряжения. Таким образом, целесообразно провести сравнительный анализ влияния регулируемых параметров устройства продольной компенсации на статическую устойчивость систем различных классов напряжений с учетом автоматических регуляторов возбуждения на синхронных генераторах электростанции.

Материалы и методы. Исследования проведены с использованием методов математического моделирования электроэнергетической системы, теории дальних линий электропередачи и электромеханических переходных процессов, а также методов анализа устойчивости электроэнергетических систем. В качестве инструмента моделирования применено оригинальное программное обеспечение на языке программирования C++.

Результаты. Произведен выбор параметров законов регулирования управляемого устройства продольной компенсации и автоматического регулятора возбуждения при условии сохранения статической устойчивости. Построены области устойчивости исследуемой электроэнергетической системы в зависимости от настроечных параметров рассматриваемых устройств для различных классов напряжения. Проведен сравнительный анализ характеристик режимов линий высокого и сверхвысокого напряжений. Определены значения коэффициентов регулирования устройства продольной компенсации и автоматического регулятора возбуждения генераторов, при которых не происходит нарушение статической колебательной устойчивости для различных видов областей устойчивости.

Выводы. Проведенный сравнительный анализ характеристик линий высокого и сверхвысокого напряжений свидетельствует о необходимости учета класса напряжения электропередачи при комплексном выборе настроечных параметров управляемого устройства продольной компенсации и автоматического регулятора возбуждения генераторов.

Ключевые слова: статическая колебательная устойчивость, линии электропередачи высокого напряжения, линии электропередачи сверхвысокого напряжения, управляемое устройство продольной компенсации, автоматическое регулирование возбуждения

Valery Pavlovich Golov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Russia, Ivanovo, e-mail: golov@ispu.ru

Dmitriy Nikolayevich Kormilitsyn

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head 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

Comparison of characteristics of lines of high and extra-high voltage when selecting the parameters of controlled device of series compensation

Abstract

Background. The use of series compensation devices leads to an increase of the transmission line capacity. However, it also increases the risk of an oscillatory violation of the stability of the electric power system. Cumulative hunting and self-excitation of the system is observed in the systems with controlled series compensation devices with a high degree of capacitive compensation. It is known that automatic excitation control of generators partially eliminates the negative effect of series capacitive compensation on oscillatory stability. Therefore, when choosing the tuning parameters of controlled devices, it is necessary to consider their combined effect on the system modes. The developed methods to study steady-state stability make it possible to analyze the modes of power systems with controlled power transmission of various voltage levels. Thus, it is advisable to conduct a comparative analysis of the influence of the adjustable parameters of the series compensation device on the steady-state stability of systems of various voltage levels, considering synchronous generators automatic excitation control.

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

Results. The choice of controlled series compensation device and the automatic excitation control regulation laws parameters is made, provided that steady-state stability is maintained. The stability regions of the studied electric power-engineering system are constructed depending on the tuning parameters of the considered devices of various voltage levels. A comparative analysis of the characteristics of the modes of high and extra-high voltage lines has been carried out. The regulation coefficients values of controlled series compensation device and automatic excitation of generators have been determined, under which there is no violation of oscillatory stability for different voltage levels.

Conclusions. The conducted comparative analysis of the characteristics of high and extra-high voltage power lines demonstrates the need to consider the power transmission rated voltage when comprehensively selecting the tuning parameters of the controlled series compensation device and the automatic excitation control regulator.

Key words: oscillatory stability, high voltage power lines, extra-high voltage power lines, controlled series compensation device, automatic excitation control

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.039-045

Состояние вопроса. Управляемые устройства продольной компенсации (УУПК) признаны в мировом научном сообществе одним из методов увеличения пропускной способности существующих линий электропередачи [1].

Максимальная мощность, передаваемая по идеализированной линии, определяется по известной формуле:

$$P_{\max} = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta, \quad (1)$$

где U_1 , U_2 – напряжение в начале и в конце линии соответственно; X – реактивное сопротивление линии; $\sin \delta$ – угол между векторами напряжений U_1 и U_2 [2].

УУПК позволяет плавно регулировать емкостное сопротивление в широком диапазоне, тем самым увеличивая нагрузочную способность электропередачи.

Кроме того, регулируемое УПК влияет на статическую устойчивость электроэнергетической системы (ЭЭС). Неправильный выбор коэффициентов регулирования УУПК

может привести к нарушению колебательной статической устойчивости. Самораскачивание и самовозбуждение системы являются примерами нарушений такого рода [3]. На выбор настроечных параметров УУПК также влияет наличие в системе других управляемых устройств, в том числе автоматических регуляторов возбуждения на генераторах электростанций. Следовательно, при совместном регулировании необходимо учитывать комплексное влияние на параметры ЭЭС.

Разработанные методики для исследования статической устойчивости позволяют анализировать энергосистемы с управляемой электропередачей различных классов напряжения. Следовательно, интерес представляет сравнительный анализ влияния регулируемых параметров устройства продольной компенсации на статическую устойчивость систем различных классов напряжений с учетом автоматических регуляторов возбуждения на синхронных генераторах электростанции.

Материалы и методы. Модель расматриваемой электроэнергетической системы. Исследование производилось для двух простейших электроэнергетических систем высокого и сверхвысокого напряжений, содержащих управляемую линию электропередачи. Исследуемые электроэнергетические системы 220 кВ и 500 кВ изображены на рис. 1, 2 соответственно. Структура представленных моделей идентична: генераторы электрической станции с автоматическим регулированием возбуждения (АРВ) соединены с системой двухцепной линии электропередачи с расщепленной фазой на три провода с установленным управляемым устройством продольной компенсации (УУПК) в середине линии. На выводах УУПК установлены шунтирующие реакторы (ШР) [4, 11].

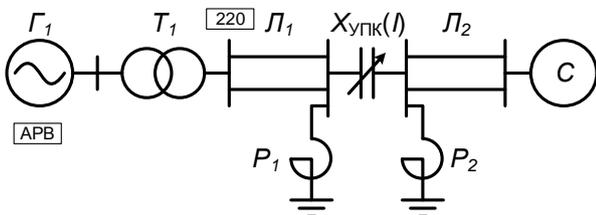


Рис. 1. Исследуемая электроэнергетическая система, содержащая управляемую ЛЭП ВН

На основе схем замещения систем сформированы математические модели. Они состоят из дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих

электромагнитные и электромеханические переходные процессы во всех элементах системы [5].

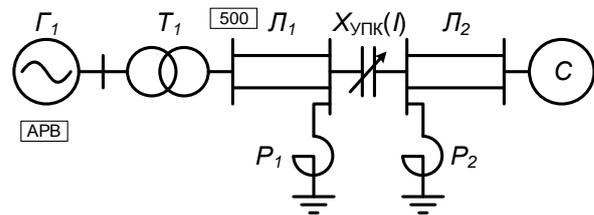


Рис. 2. Исследуемая электроэнергетическая система, содержащая управляемую ЛЭП СВН

Закон регулирования АРВ при анализе статической устойчивости [6] имеет вид

$$\Delta u_f = K_{0U}(U_0 - U_f), \quad (2)$$

где Δu_f – значение добавочного напряжения обмотки возбуждения под воздействием АРВ; K_{0U} – коэффициент регулирования по отклонению напряжения генератора; U_0 – уставка АРВ пропорционального действия генератора по напряжению; U_f – напряжение на выводах генератора.

Регулирование степени компенсации на линии с управляемым УПК осуществляется путем изменения емкостного сопротивления в зависимости от тока линии (передаваемой по линии мощности) [7, 8]:

$$X_{ууПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_{1ууПК} - K_{2ууПК} \cdot I)}, \quad (3)$$

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

Оценка устойчивости энергосистемы выполняется по характеру протекания переходного процесса при задании «малого» возмущения [9]. Под «малым» возмущением в данном исследовании принимается кратковременное (на 0,05 с) увеличение мощности турбины на 5 % от значения в исходном установившемся режиме.

Расчеты характеристик установившихся режимов систем выполнены с учетом минимального коэффициента запаса статической аperiodической устойчивости по активной мощности ($K_{p,min} = 0,2$) с использованием оригинального программного обеспечения на языке программирования С++ [10].

Результаты исследования. На рис. 3–5 представлены области статической колебательной устойчивости для электропередачи

сверхвысокого напряжения 500 кВ при различных значениях длины ЛЭП и одинаковых начальных значениях сопротивления $X_{уупк}$. Аналогичные области статической устойчивости построены для электропередачи высокого напряжения 220 кВ (рис. 6, 7) [11].

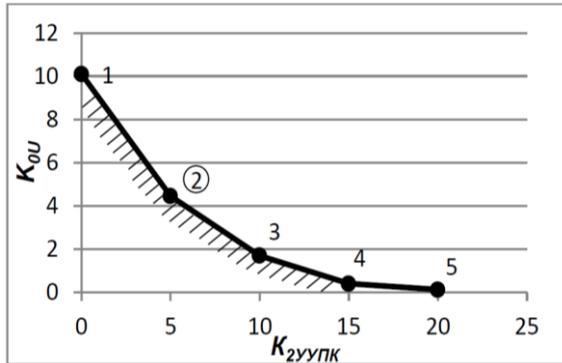


Рис. 3. Область устойчивости системы СВН при длине линии $L = 1000$ км и $X_{уупк} = 0,888$ о.е.

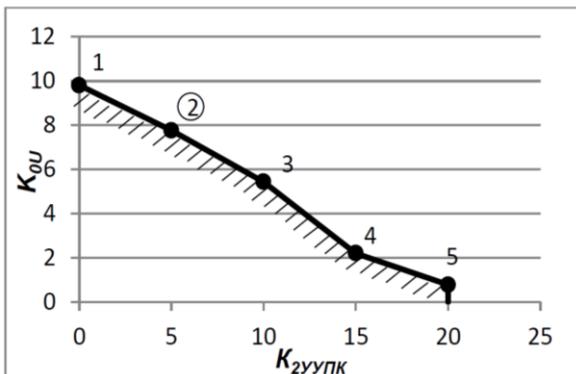


Рис. 4. Область устойчивости системы СВН при длине линии $L = 1300$ км и $X_{уупк} = 0,888$ о.е.

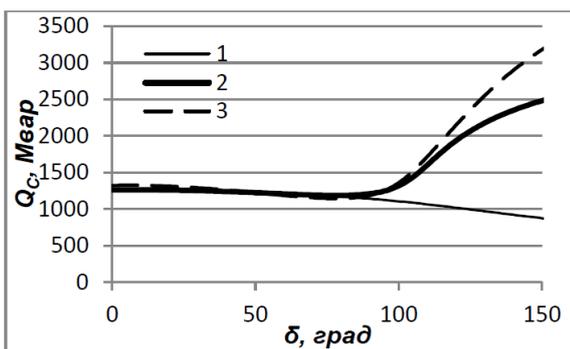


Рис. 5. Зарядная мощность ЛЭП СВН при $L = 800$ км при различных коэффициентах регулирования УУПК: 1 – $K_{2уупк} = 0$; 2 – $K_{2уупк} = 5$; 3 – $K_{2уупк} = 10$

Анализ результатов построения показывает, что в случае электропередачи сверхвысокого напряжения при увеличении коэффициента регулирования $K_{2уупк}$ колебатель-

ная статическая устойчивость при допустимом уровне напряжения на шинах генератора обеспечивается при меньшем коэффициенте усиления АРВ K_{0U} (рис. 3–5).

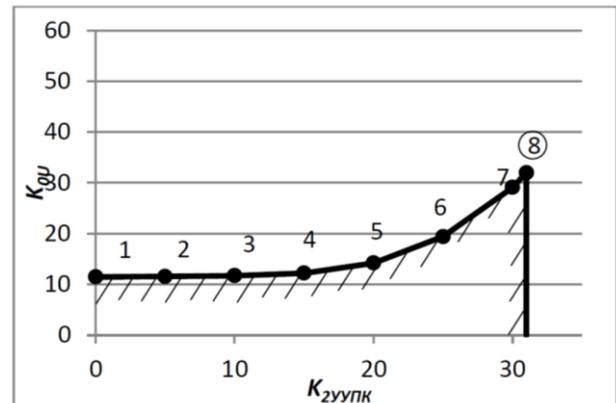


Рис. 6. Область устойчивости системы ВН при длине линии $L = 200$ км и $X_{уупк} = 0,232$ о.е.

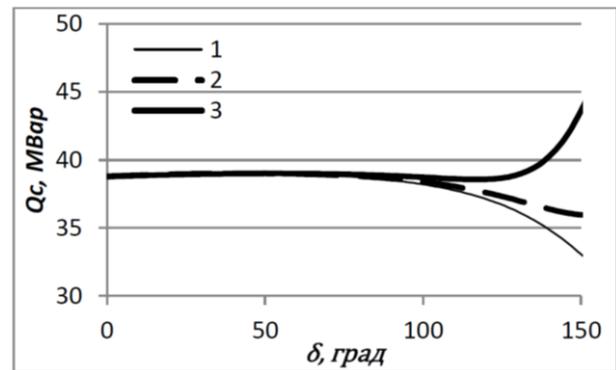


Рис. 7. Зарядная мощность ЛЭП ВН при $L = 126$ км при различных коэффициентах регулирования УУПК: 1 – $K_{2уупк} = 0$; 2 – $K_{2уупк} = 5$; 3 – $K_{2уупк} = 10$

В случае электропередачи высокого напряжения, наоборот, при увеличении коэффициента регулирования $K_{2уупк}$ возможный диапазон изменения коэффициента усиления АРВ K_{0U} больше для тех же условий (рис. 8).

Такую закономерность можно объяснить, обратившись к схеме замещения линии электропередачи (рис. 9).

Любая линия электропередачи обладает емкостной проводимостью $b_{л}$, обусловленной емкостью между проводами, между проводами и землей, наличием заземленных тросов и параллельными линиями. Под действием приложенного напряжения через емкости линий электропередачи протекают емкостные (зарядные) токи, которые определяют генерацию зарядной мощности.

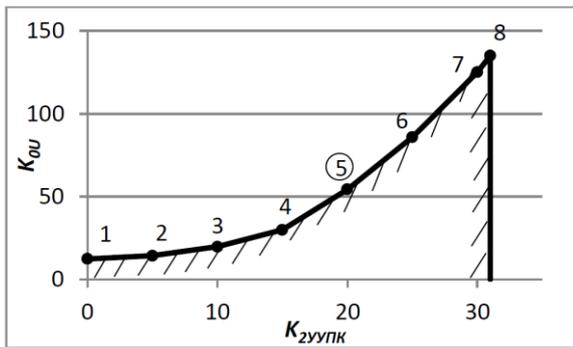


Рис. 8. Область устойчивости системы ВН при длине линии $L = 126$ км и $X_{УУПК} = 0,232$ о.е.

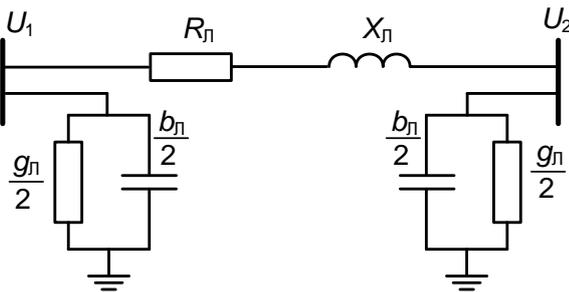


Рис. 9. Схема замещения линии электропередачи

Значение зарядной мощности можно определить по следующей формуле [12]:

$$Q_C = -U^2 b_0 l, \tag{4}$$

где Q_C – зарядная мощность линии электропередачи, МВар; U – напряжение, кВ; b_0 – удельная емкостная проводимость, См/км; l – длина линии, км.

Кроме генерации реактивной мощности в линии существуют и потери реактивной мощности в индуктивности X_L , которые можно определить по формуле

$$\Delta Q_L = I^2 x_0 l = I^2 X_L, \tag{5}$$

где I – ток, протекающий по линии, кА; x_0 – продольное индуктивное сопротивление, Ом/км; l – длина линии, км.

В зависимости от передаваемой мощности, в линиях может возникнуть либо избыток реактивной мощности, который будет вызывать повышение напряжения в сети, либо дефицит реактивной мощности, приводящий к снижению напряжения. В этих случаях действие АРВ будет различным.

Для электропередачи сверхвысокого и высокого напряжений построены характеристики зарядной мощности для различных коэффициентов регулирования $K_{2УУПК}$ (рис. 5, 7). Стоит отметить, что зарядная мощность линии пропорциональна квадрату

напряжения, следовательно, зарядная мощность ЛЭП СВН имеет существенно большее значение по сравнению с ЛЭП ВН. Кроме того, на значение зарядной мощности влияет длина ЛЭП, которая в данном исследовании для электропередачи СВН превосходит более чем в 6 раз длину ЛЭП ВН.

Согласно закону регулирования УУПК (2), увеличение коэффициента $K_{2УУПК}$ приводит к увеличению значения $X_{УУПК}$ и уменьшению суммарного продольного реактивного сопротивления ($X_{\Sigma} = X - X_{УУПК}$). Следовательно, сокращаются потери реактивной мощности и в системе возникает избыток реактивной мощности, генерируемой ЛЭП, который приводит к повышению напряжения на шинах генератора. Таким образом, для снижения напряжения до допустимых значений при сохранении колебательной статической устойчивости необходимо уменьшить коэффициент регулирования АРВ генератора K_{OU} (рис. 3–5).

В случае электропередачи высокого напряжения при увеличении коэффициента $K_{2УУПК}$ в системе происходят процессы, аналогичные процессам в системе с ЛЭП СВН, однако они не приводят к избытку реактивной мощности в силу более низкого класса напряжения электропередачи и малой протяженности линии. Таким образом, суммарная генерируемая реактивная мощность не компенсирует её потери в продольной части электропередачи, что приводит к понижению напряжения на шинах генератора. Следовательно, необходимо увеличить коэффициент усиления АРВ генератора K_{OU} для достижения допустимого значения напряжения при сохранении колебательной статической устойчивости (рис. 6, 7).

Сравнение характеристик линий высокого напряжения разной длины (рис. 6, 8) показывает, что при большей длине область устойчивости располагается ниже. Это объясняется тем, что с увеличением длины ЛЭП зарядная мощность также увеличивается (4). Следовательно, для того чтобы значения напряжений находились в допустимых пределах, требуется меньший коэффициент регулирования АРВ.

На рис. 10, 11 представлены семейства угловых характеристик активной мощности, соответствующих граничным режимам колебательной статической устойчивости для электропередачи сверхвысокого и высокого напряжений. Нумерация угловых

характеристик совпадает с нумерацией точек на соответствующих областях устойчивости. Анализ угловых характеристик показывает, что максимальный предел передаваемой мощности достигается при определенном сочетании коэффициентов регулирования УУПК и АРВ генераторов. Режимы, в которых наблюдается максимум активной мощности, на областях устойчивости обведены окружностью (рис. 3, 4, 6, 8).

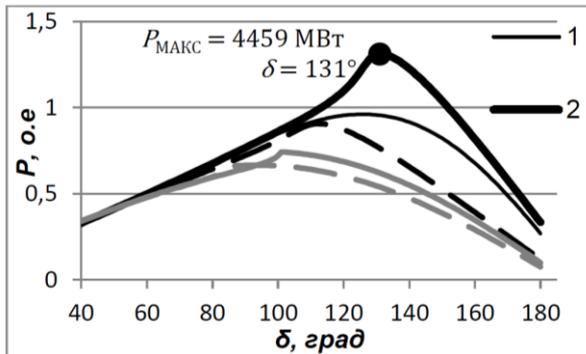


Рис. 10. Угловые характеристики активной мощности для граничных точек области устойчивости электропередачи СВН при длине линии $L = 1000$ км

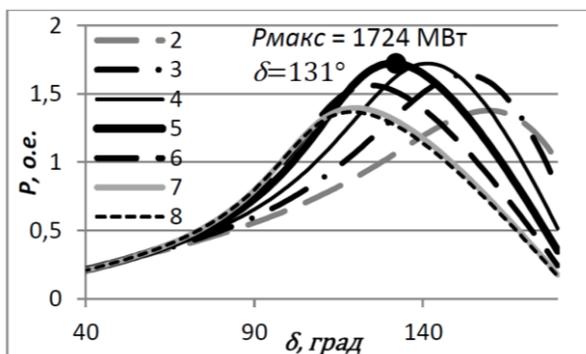


Рис. 11. Угловые характеристики активной мощности для граничных точек области устойчивости электропередачи ВН при длине линии $L = 126$ км

На рис. 11 представлены угловые характеристики активной мощности для системы с ЛЭП 220 кВ. Значение максимального предела передаваемой активной мощности составляет $P_{\text{макс}} = 1724$ МВт. Это значение имеет чисто теоретический смысл, так как соответствует углу δ , равному 131° . Данный режим не входит в диапазон возможных длительных эксплуатационных режимов, которые, как правило, ограничиваются значениями углов δ не более 70° при необходимых коэффициентах запаса статической устойчивости. Для таких режимов

мощность имеет вполне приемлемые значения для ЛЭП 220 кВ с управляемым УПК, дающим повышение передаваемой мощности.

Выводы. На основе сравнения характеристик линий высокого и сверхвысокого напряжений установлено следующее.

1. При комплексном подходе к выбору настроечных параметров АРВ генераторов и УУПК необходимо учитывать класс напряжения, которым выполнена электропередача, поскольку области устойчивости имеют различный вид. Для электропередачи сверхвысокого напряжения диапазон изменения коэффициента регулирования АРВ генераторов шире при небольших коэффициентах регулирования УУПК, а для высокого напряжения этот диапазон больше при максимальных значениях коэффициента регулирования УУПК.

2. Анализ характеристик передаваемой активной мощности для ЛЭП СВН показывает возможность совместного выбора настроечных параметров УПК и АРВ для областей устойчивости и характеристик устойчивости, дающих максимальное значение этой мощности, что показано на примере ЛЭП ВН [11].

Список литературы

1. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.: Высш. шк., 1985. — 536 с.
2. **Идельчик В.И.** Электрические системы и сети: учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.
3. **Москвин И.А.** Колебательная статическая устойчивость электроэнергетической системы с межсистемной связью, содержащей регулируемое устройство продольной компенсации // Вестник ИГЭУ. — 2013. — Вып. 5. — С. 46–50.
4. **Критерий** апериодической статической устойчивости электроэнергетической системы с управляемым устройством продольной компенсации на линии 220 кВ / В.П. Голов, Д.Н. Кормилицын, А.В. Калуцков, О.С. Суханова // Вестник ИГЭУ. — 2020. — Вып. 5. — С. 13–24.
5. **Использование** управляемых линий электропередачи с регулируемой последовательной компенсацией для реализации адаптивных сетей / В.П. Голов, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин, Д.Н. Кормилицын // Российская Электротехника. — 2017. — Т. 88, Вып. 2. — С. 60–66.
6. **Братолобов 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.

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

8. Голов В.П., Мартиросян А.А., Москвин И.А. Расчет характеристик установившихся режимов электроэнергетической системы с регулируемым устройством продольной компенсации // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 18–22.

9. Голов В.П., Кормилицын Д.Н., Суханова О.С. Анализ влияния управляемой линии высокого напряжения и автоматического регулирования возбуждения генераторов на колебательную устойчивость электроэнергетической системы // Вестник ИГЭУ. – 2022. – Вып. 1. – С. 38–45.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021668911 Российская Федерация. Комплекс расчета статической устойчивости управляемой электроэнергетической системы с учетом нормативного коэффициента запаса статической апериодической устойчивости по активной мощности / Д.Н. Кормилицын, О.С. Суханова; опубл. 22.11.2021.

11. Голов В.П., Кормилицын Д.Н., Суханова О.С. Предел передаваемой мощности управляемой линии электропередачи высокого напряжения для режимов на границе статической устойчивости // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 2. – С. 28–35.

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

13. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие. – Ростов-н/Д.: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006. – 720 с.

References

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

2. Idel'chik, V.I. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 592 p.

3. Moskvina, I.A. Kolebatel'naya staticheskaya ustoychivost' elektroenergeticheskoy sistemy s mezhsistemnoy svyaz'yu, sodержashchey reguliruemoe ustroystvo prodol'noy kompensatsii [Oscillatory stability of an electrical power system with interconnection, containing an adjustable longitudinal compensation device]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 5, pp. 46–50.

4. Golov, V.P., Kormilitsyn, D.N., Kalutskov, A.V., Sukhanova, O.S. Kriteriy aperiodicheskoy staticheskoy ustoychivosti elektroenergeticheskoy sistemy s upravlyaemym ustroystvom prodol'noy kompensatsii na linii 220 kV [Aperiodic

steady-state stability criterion of electric power system with controlled series compensation on 200 kV line]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 6, pp. 14–24.

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

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

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

8. Golov, V.P., Martirosyan, A.A., Moskvina, I.A. Raschet kharakteristik ustanovivshikhsya rezhimov elektroenergeticheskoy sistemy s reguliruemym ustroystvom prodol'noy kompensatsii [Calculation of Characteristics of Steady Modes of an Electric Power System with an Adjustable Series Compensation Device]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 6, pp. 18–22.

9. Golov, V.P., Kormilitsyn, D.N., Sukhanova, O.S. Analiz vliyaniya upravlyaemoy linii vysokogo napryazheniya i avtomaticheskogo regulirovaniya возбуждениya генераторов на колебательную устойчивость электроenergeticheskoy sistemy [Analysis of influence of controlled high voltage line and automatic excitation control generators on oscillatory steady-state stability of electric-power system]. *Vestnik IGEU*, 2022, issue 1, pp. 38–45.

10. Kormilitsyn, D.N., Sukhanova, O.S. Kompleks rascheta staticheskoy ustoychivosti upravlyaemoy elektroenergeticheskoy sistemy s uchetom normativnogo koeffitsienta zapasa staticheskoy aperiodicheskoy ustoychivosti po aktivnoy moshchnosti [The complex for calculating the steady-state stability of a controlled electric power system, taking into account the standard safety factor of aperiodic stability in terms of active power]. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM 2021668911* [Certificate of state registration of a computer program 2021668911], 2021.

11. Golov, V.P., Kormilitsyn, D.N., Sukhanova, O.S. Predel peredavaemoy moshchnosti upravlyaemoy linii elektropredachi vysokogo napryazheniya dlya rezhimov na granitse staticheskoy ustoychivosti [Transmitted power limit of controlled high voltage transmission line for modes on steady-state stability boundary]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 2, pp. 28–35.

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

13. Gerasimenko, A.A., Fedin, V.T. *Peredacha i raspredelenie elektricheskoy energii* [Transmission and distribution of electrical energy]. Rostov-n/D.: Feniks; Krasnoyarsk: Izdatel'skie proekty, 2006. 720 p.

УДК 621.313.3

Александр Николаевич Назарычев

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: nazarychev@mail.ru

Денис Андреевич Полкошников

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: pda37@yandex.ru

Александр Станиславович Страхов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново, e-mail: astrakhov90@yandex.ru

Евгений Михайлович Новоселов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново, e-mail: captain.udgin@gmail.com

Михаил Алексеевич Захаров

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Россия, Иваново, e-mail: mazoid@gmail.com

Андрей Александрович Скоробогатов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново, e-mail: aaskor.andrey@yandex.ru

Исследование сигнала внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя в режиме выбега

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время одной из важных научных задач является разработка и совершенствование методов неразрушающего контроля асинхронных электродвигателей в процессе эксплуатации. Одним из перспективных направлений диагностики является использование сигнала внешнего магнитного поля, однако его исследованию в режиме выбега авторами научных публикаций не уделяется должного внимания, несмотря на ряд преимуществ данного сигнала. В связи с этим цель работы, заключающаяся в подтверждении возможности регистрации и исследования сигнала индукции радиальной составляющей внешнего магнитного поля в режиме выбега асинхронного двигателя, является актуальной.

Материалы и методы. Исследования проведены на нескольких экспериментальных стендах, на реальных низковольтных и высоковольтных асинхронных двигателях и на имитационной модели асинхронного электродвигателя, выполненной в программном комплексе Ansys. Для обработки сигналов, а именно построения частотно-временных спектров внешнего магнитного поля в режиме выбега, использована программа на основе оконного преобразования Фурье с применением в качестве оконной функции окна Флэттоп для более точного определения амплитуд гармонических составляющих.

Результаты. В ходе проведенных исследований на экспериментальных стендах установлено, что внешнее магнитное поле двигателя в режиме выбега будет существовать вследствие явления остаточной намагниченности. Доказана возможность моделирования асинхронных двигателей с учетом остаточной намагниченности и подтверждена достоверность полученной модели. Представлены спектры сигналов внешнего магнитного поля на реальных двигателях и имитационных моделях в режиме выбега.

Выводы. Сигнал внешнего магнитного поля в режиме выбега может быть зарегистрирован как на имитационных моделях, так и на реальных низковольтных и высоковольтных асинхронных электродвигателях. В ходе дальнейших исследований планируется проанализировать возможность выявления неисправностей асинхронных двигателей с помощью данного сигнала.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, внешнее магнитное поле, режим выбега, датчик Холла, имитационное моделирование

Alexander Nikolaevich Nazarychev

Saint Petersburg Mining University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Electrical Power Engineering and Electrical Mechanics Department, Russia, St. Petersburg, e-mail: nazarychev@mail.ru

Denis Andreevich Polkoshnikov

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Electrical Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: pda37@yandex.ru

Alexander Stanislavovich Strakhov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electrical Plants, Substations and Electrical Equipment Diagnostics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: astra-khov90@yandex.ru

Evgeny Mikhailovich Novoselov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electrical Plants, Substations and Electrical Equipment Diagnostics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: captain.udgin@gmail.com

Michael Alekseevich Zakharov

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Russia, Ivanovo, e-mail: mazoid@gmail.com

Andrey Alexandrovich Skorobogatov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electrical Plants, Substations and Electrical Equipment Diagnostics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: aaskor.andrey@yandex.ru

Study of the external magnetic field signal of an asynchronous electric motor in run-down mode

Abstract

Background. Currently, one of the important scientific tasks is the development and improvement of methods for non-destructive testing of asynchronous electric motors during operation. One of the promising areas of diagnostics is the use of an external magnetic field signal. However, its study in the run-down mode is not given due attention by the authors of scientific publications, despite a number of advantages of this signal. Therefore, the aim of this research is to confirm the possibility to record and study the signal of the radial component of the induction of the external magnetic field in the run-down mode of an asynchronous motor. So, the aim is relevant.

Materials and methods. The research is carried out using several test benches, real low-voltage and high-voltage asynchronous motors and a simulation model of an asynchronous electric motor designed in the Ansys software package. To process the signals, namely, to construct the frequency-time spectra of the external magnetic field in the run-down mode, the authors have used a program based on the Short Time Fourier Transform using the Flat-top window as a window function to more accurately determine the amplitudes of the harmonic components.

Results. During the research conducted on test benches, it has been found that the external magnetic field of the motor in the run-down mode will exist due to the phenomenon of residual magnetization. The possibility of modeling asynchronous motors considering residual magnetization has been proven and the reliability of the resulting model has been confirmed. The spectra of external magnetic field signals on real motors and simulation models in the run-down mode are presented.

Conclusions. The external magnetic field signal in the run-down mode can be recorded both on simulation models and on real low-voltage and high-voltage asynchronous electric motors. During further research, it is planned to analyze the possibility of identifying faults in asynchronous motors using this signal.

Key words: asynchronous motor, external magnetic field, run-down mode, Hall sensor, simulation

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.046-054

Состояние вопроса. Одним из актуальных вопросов современной электроэнергетики и электротехники является повышение надежности функционирования

асинхронных двигателей (АД), которые являются приводами многих ответственных механизмов в различных отраслях промышленности. В связи с этим большое внимание

уделяется разработке новых и совершенствованию уже существующих методов контроля технического состояния узлов АД в процессе эксплуатации.

Одним из современных направлений контроля технического состояния является анализ внешнего магнитного поля (ВМП) АД (на корпусе). При этом в существующих публикациях, в том числе в работах авторов статьи, рассматриваются вопросы применения в целях диагностики сигналов индукции ВМП как в установившемся режиме работы [1–7], так и при пуске АД [8]. При этом исследованию режима выбега в целях контроля состояния АД не уделяется должного внимания, хотя в ряде работ исследуется возможность применения иных сигналов в режиме выбега [9, 10]. Проведение контроля в режиме выбега имеет ряд неоспоримых преимуществ, связанных с тем, что двигатель отключен от сети. К ним можно отнести отсутствие помех от полей, наводимых током статора на работающем АД, возможность контроля состояния АД без подключения рабочей машины, а также большую безопасность проведения контроля по сравнению с установившимся и особенно пусковым режимом.

Возможность регистрации ВМП в режиме выбега при отключенном АД обусловлена явлением остаточной намагниченности. Поскольку для любого магнитного материала, в том числе электротехнической стали, характерно явление гистерезиса, даже при снятии напряжения с обмотки статора и равенстве тока статора нулю поле двигателя может существовать.

В связи с вышесказанным, целью нашего исследования является подтверждение возможности регистрации и исследования сигнала ВМП в режиме выбега АД. При этом для проведения дальнейших исследований необходимо доказать возможность как моделирования сигнала ВМП в режиме выбега с учетом остаточной намагниченности в специализированном программном комплексе Ansys, так и регистрации этого сигнала на реальных низковольтных и высоковольтных асинхронных электродвигателях.

Материалы и методы. План исследований был разделен на три отдельных этапа. Первоначально были произведены исследования на двух специальных экспериментальных установках, представленных на рис. 1 и 3 для доказательства влияния остаточной намагниченности на ВМП АД.

В ходе первого эксперимента (рис. 1) два одинаковых АД типа АИР71А6 напряжением 380 В, мощностью 370 Вт с 3 парами полюсов были соединены друг с другом, при этом один из них подключен к сети переменного напряжения (АД №1). Регистрация индукции радиальной составляющей ВМП осуществлялась с помощью датчика Холла 1, в качестве АЦП использовалась полупрофессиональная звуковая карта Focusrite Scarlett 2i2 2, запись осуществлялась на ноутбук 3, где и производилась обработка результатов эксперимента. Регистрация ВМП осуществлялась в нескольких точках, отмеченных на рис. 2, расстояния измерялись с помощью линейки 4. Основной целью данного эксперимента являлось доказательство увеличения индукции ВМП на корпусе АД №2, ротор которого вращается от АД №1, но при этом отключен от сети.

Во втором эксперименте (рис. 3) ротор АД №2, отключенного от сети, вращался от руки. В данном случае производилась регистрация не только ВМП с помощью датчика Холла (ДХ), но и внутреннего магнитного поля в воздушном зазоре с помощью внутреннего индуктивного датчика (ВИД), который представляет собой два витка провода, намотанного на один из зубцов статора. Целью эксперимента являлось доказательство того, что ВМП не наводится от соседнего электродвигателя АД №1, а возникает именно вследствие явления остаточной намагниченности.

Далее были произведены исследования на имитационной модели АД АИР 71А6 (рис. 4). Основной целью которых было воссоздание сигнала индукции ВМП в режиме выбега. Модель выполнена в программном комплексе Ansys, расчет ВМП осуществлялся на основе метода конечных элементов. Первоначально двигатель в течение 6 секунд работал в установившемся режиме, после чего моделировался режим выбега. Для моделирования явления остаточной намагниченности была задана петля гистерезиса для используемой в АД стали.

Наконец, после проведения исследования на моделях были зарегистрированы сигналы на АИР71А6 в режиме выбега на экспериментальном стенде, а также на нескольких АД на электрических станциях, являющихся приводами дымососов и дутьевых вентиляторов, для доказательства возможности регистрации сигнала ВМП на реальных двигателях. Измерение индукции

ВМП осуществлялось так же, как и в описанных выше экспериментах. Также для более детального исследования были построены частотно-временные спектры (ЧВС) сигналов в режиме выбега. Для их получения использовалась программа,

разработанная в программном комплексе Matlab на основе оконного преобразования Фурье с использованием в качестве оконной функции окна Флэттоп, чтобы можно было более точно оценить амплитуды гармоник в сигналах ВМП.

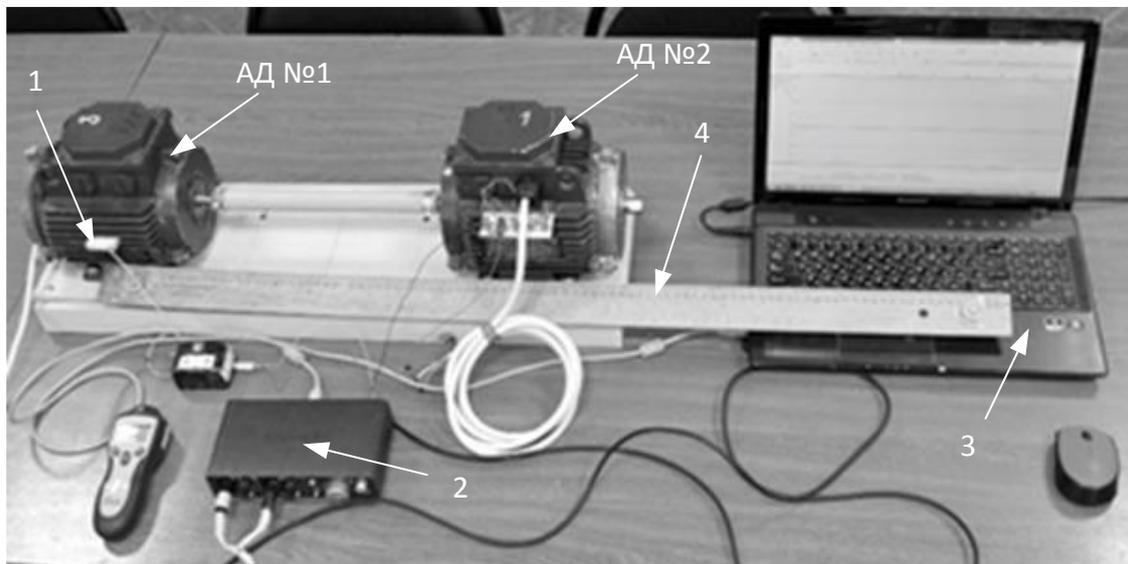


Рис. 1. Фотография первого экспериментального стенда для доказательства влияния остаточной намагниченности на сигнал ВМП АД типа АИР 71А6

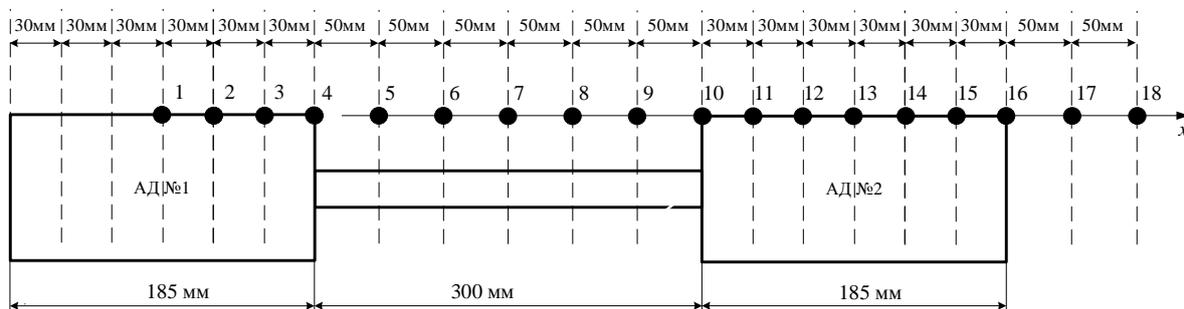


Рис. 2. Точки измерения магнитного поля в ходе первого эксперимента

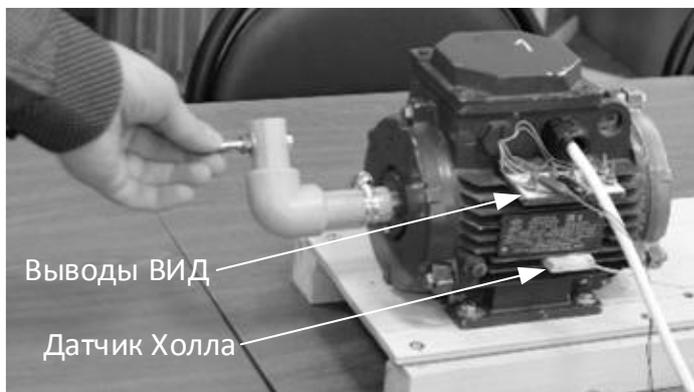


Рис. 3. Фотография второго экспериментального стенда для доказательства влияния остаточной намагниченности на магнитное поле АД типа АИР 71А6

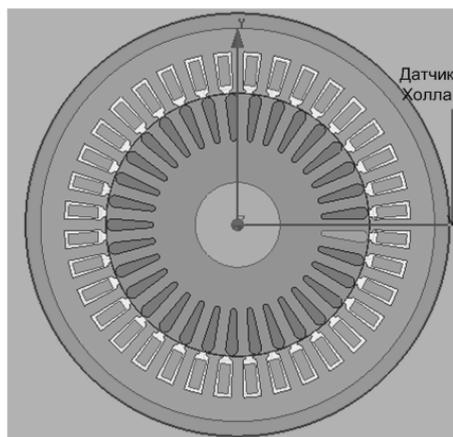


Рис. 4. Компьютерная модель АД типа АИР 71А6

Результаты. Результаты первого эксперимента на двух соединенных электродвигателях, а именно значения индукции магнитного поля в рассматриваемых 18 точках (см. рис. 2), представлены в таблице и на рис. 5.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Наибольшие значения индукции получаются на корпусе АД №1 (точки 1–4), на который подается напряжение, при удалении от него индукция становится практически равной нулю. Однако на корпусе АД №2 значение индукции также возрастает, хотя он и не подключен к сети. Это подтверждает тот факт, что источником внешнего магнитного поля является остаточная намагниченность АД и она может быть зарегистрирована с помощью датчика Холла.

Результаты второго эксперимента представлены на рис. 6. Был произведен анализ внутреннего магнитного поля по сигналу, зарегистрированному с помощью ВИД, и индукции ВМП по сигналу с датчика

Холла. Анализ полученных результатов (рис. 6) показывает, что для АД, находящегося в состоянии покоя, индукция внутреннего и внешнего магнитных полей значительно ниже по сравнению с вращающимся ротором АД. Это подтверждает тот факт, что источником магнитного поля является именно остаточная индукция сердечника ротора самого АД.

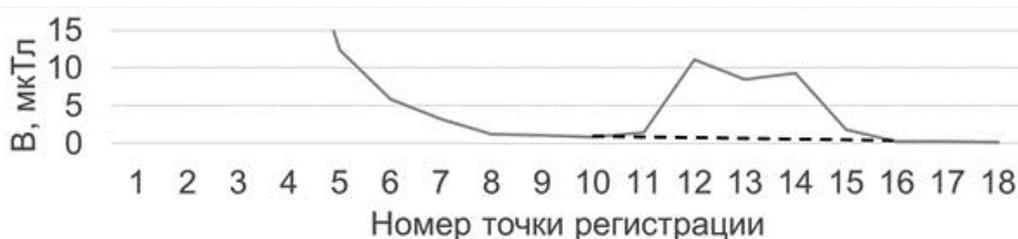
После этого были проанализированы ЧВС сигнала ВМП на асинхронном двигателе типа АИР71А6 и на его имитационной модели в программном комплексе Ansys с учетом остаточной намагниченности. Полученные спектры ВМП представлены на рис. 7 и 8 соответственно. Амплитуды гармоник можно оценить по представленной справа цветовой шкале. Анализ полученных результатов показывает, что как на математической модели, так и на реальном двигателе в спектре можно отчетливо увидеть основную гармонику сигнала, частота которой в процессе выбега определяется скоростью вращения асинхронного электродвигателя.

Значения индукции магнитного поля в указанных на рис. 2 точках

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Индукция магнитного поля, мкТл	1292	1922	193,2	33,12	12,38	5,86	3,29	1,22	1,12
Номер точки	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Индукция магнитного поля, мкТл	0,84	1,45	11,14	8,51	9,35	1,8	0,27	0,24	0,2



а)

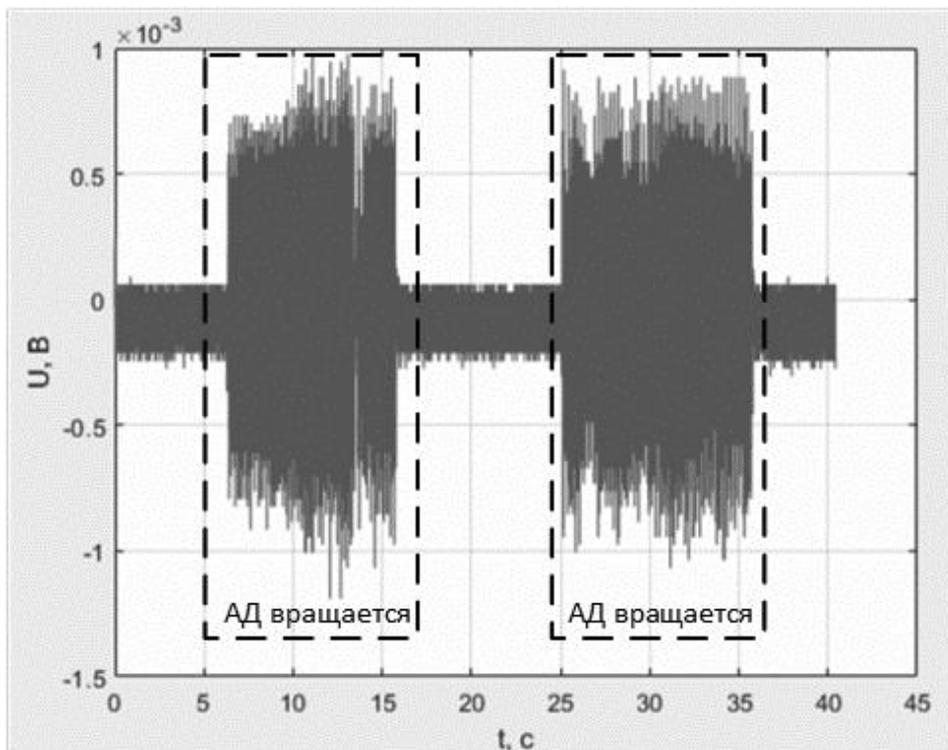


б)

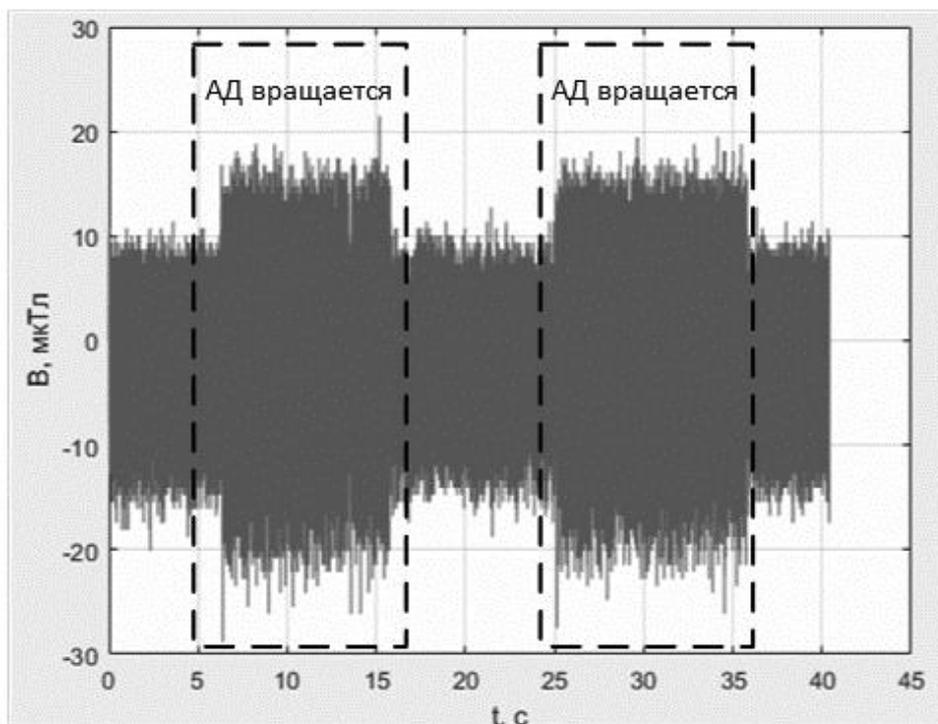
Рис. 5. Значения индукции ВМП в исследуемых точках (см. рис. 2) в ходе первого эксперимента: а – в диапазоне от 0 до 2000 мкТл; б – в диапазоне от 0 до 15 мкТл (участок 1)

Сопоставляя спектры на реальном двигателе и его модели, можно сказать, что они с достаточной точностью соответствуют друг другу как по величине амплитуды ос-

новной гармоники сигнала, так и по изменению ее частоты, что подтверждает корректность разработанной модели с учетом остаточной намагниченности.



а)



б)

Рис. 6. Результаты второго эксперимента (при вращении ротора АД рукой): а – сигнал с ВИД; б – сигнал с датчика Холла

На рис. 9 приведен пример ЧВС одного из сигналов ВМП в режиме выбега, снятого на высоковольтном АД типа ДАМСО-15-12-8, который является приводом дымососа на теплоэлектростанции. В ходе анализа спектра можно увидеть две области. В начале выбега (рис. 9, участок 2) характерны высокие значения ам-

плитуды ВМП, поскольку ток в обмотке ротора мощных высоковольтных электродвигателей на этом интервале еще не успевает полностью затухнуть. После этого наличие ВМП обусловлено уже только явлением остаточной намагниченности и практически не изменяется с течением времени (рис. 9, участок 1).

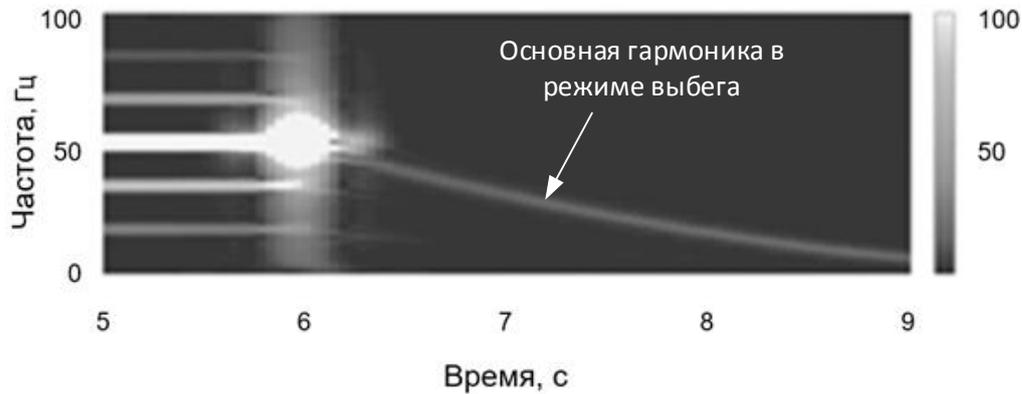


Рис. 7. ЧВС ВМП АД типа АИР71А6 в режиме выбега

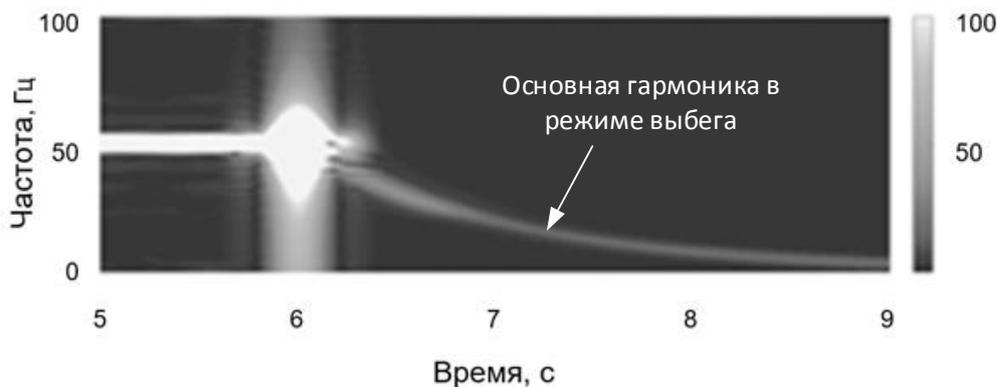


Рис. 8. ЧВС ВМП имитационной модели АД типа АИР71А6 в режиме выбега

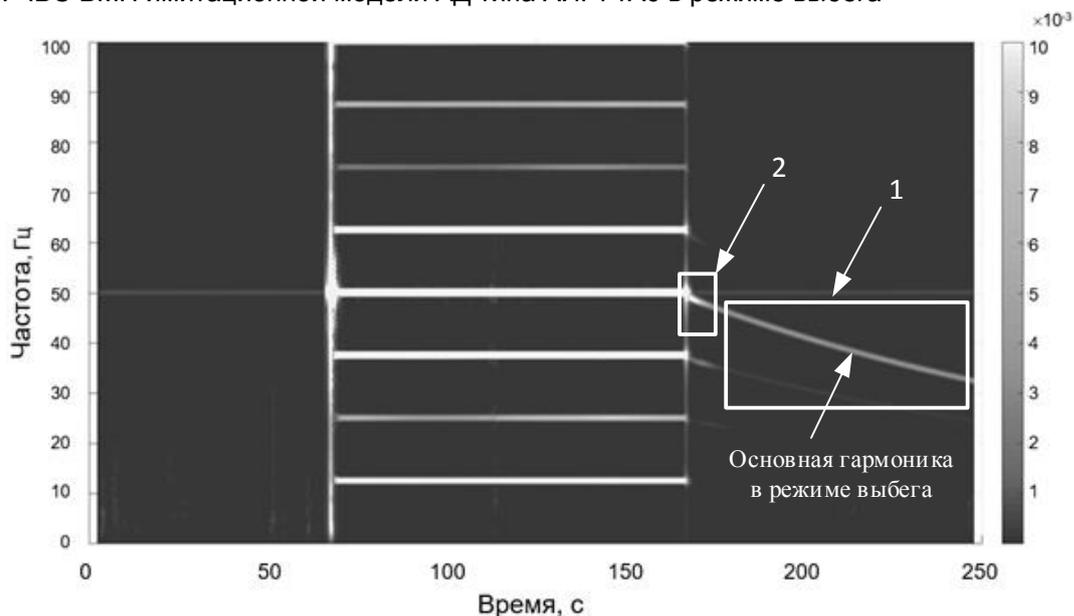


Рис. 9. ЧВС ВМП высоковольтного АД типа ДАМСО-15-12-8

Анализируя спектры реальных электродвигателей, приведенные на рис. 7 и 9, можно заметить, что на них проявляется не только основная гармоника сигнала, но и еще ряд гармонических составляющих, которые могут быть обусловлены неисправностью электродвигателя, например динамическим эксцентриситетом. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о возможности использования сигнала выбега в целях диагностики электродвигателей и о необходимости проведения дальнейших исследований в этом направлении.

Выводы. В ходе исследования доказана возможность регистрации и исследования сигнала ВМП АД в режиме выбега, который обусловлен явлением остаточной намагниченности, также подтверждена возможность моделирования АД с учетом остаточной намагниченности для анализа сигналов в режиме выбега. При этом подтверждена корректность разработанной модели.

Сделан вывод о том, что сигнал ВМП пригоден для анализа на основе оконного преобразования Фурье, что подтверждает возможность проведения дальнейших исследований в целях разработки методов контроля неисправностей АД в режиме выбега по ВМП, например выявления повреждений обмотки ротора или повышенного динамического эксцентриситета.

Список литературы

1. **Диагностика** и прогнозирование состояния асинхронных двигателей на основе использования параметров их внешнего электромагнитного поля / А.Ю. Алексеенко, О.В. Бродский, В.Н. Веденев и др. // Вестник АлтГТУ. – 2006. – № 2. – С. 9–13.
2. **Лукьянов А.В., Мухачев Ю.С., Бельский И.О.** Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2(22). – С. 61–69.
3. **Пырко С.А., Митиогло А.М., Ишметьев Е.Н.** Автономные измерительные модули для систем диагностики электродвигателей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 80–89.
4. **Оценка** возможности использования радиальной составляющей внешнего магнитного поля в целях диагностики асинхронных электродвигателей / Е.М. Новоселов, В.А. Савельев, А.А. Скоробогатов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 3. – С. 38–46.

5. **Chernyavska I., OndĚej V.** Analysis of Broken Rotor Bar Fault in a Squirrel Cage Induction Motor by Means of Stator Current and Stray Flux Measurement // International Power Electronics and Motion Control Conference. – Varna, Bulgaria, 2016. – P. 532–537.

6. **An improved** 2D subdomain model of squirrel cage induction machine including winding and slotting harmonics at steady state / E. Devillers, J. Le Besnerais, T. Lubin, et al. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2018. – Vol. 54, Issue 2. – P. 1–12.

7. **Finite** element analysis and experimental study of the nearmagnetic field for detection of rotor faults in induction motors / V. Fireteanu, R. Romary, R. Pusca, A. Ceban // Progress in Electromagnetics Research. – 2013. – Vol. 50. – P. 37–59.

8. **Экспериментальное** определение диагностических признаков повреждения обмоток роторов высоковольтных двигателей электростанций в режиме пуска / А.Н. Назарычев, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников и др. // Дефектоскопия. – 2020. – № 5. – С. 3–11.

9. **Потапенко А.О., Юсупова А.О., Латыпов С.И.** Способ диагностики повреждения короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя в режиме выбега // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 62–70.

10. **Чупров И.И., Суворов И.Ф.** Диагностика и прогнозирование технического состояния асинхронного электрического двигателя по напряжению выбега // Наука и образование: актуальные исследования и разработки: материалы I Всерос. заоч. науч.-практ. конф. – Чита, 2018. – С. 75–79.

References

1. Alekseenko, A.Yu., Brodskiy, O.V., Vedenev, V.N., Tonkikh, V.G., Khomutov, S.O. *Vestnik AltGTU*, 2006, no. 2, pp. 9–13.
2. Luk'yanov, A.V., Mukhachev, Yu.S., Bel'skiy, I.O. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2014, no. 2(22), pp. 61–69.
3. Pyrko, S.A., Mitioglo, A.M., Ishmet'ev, E.N. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2020, vol. 18, no. 1, pp. 80–89.
4. Novoselov, E.M., Savel'ev, V.A., Skorobogatov, A.A., Strakhov, A.S., Sulynenkov, I.N. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 3, pp. 38–46.
5. Chernyavska, I., OndĚej, V. Analysis of Broken Rotor Bar Fault in a Squirrel Cage Induction Motor by Means of Stator Current and Stray Flux Measurement. *International Power Electronics and Motion Control Conference*. Varna, Bulgaria, 2016, pp. 532–537.
6. Devillers, E., Le Besnerais, J., Lubin, T., Hecquet, M., Lecoite, J. An improved 2D subdomain model of squirrel cage induction machine including winding and slotting harmonics at steady

state. *IEEE Transactions on Magnetism*, 2018, vol. 54, issue 2, pp. 1–12.

7. Fireteanu, V., Romary, R., Pusca, R., Ceban, A. *Progress in Electromagnetics Research*, 2013, vol. 50, pp. 37–59.

8. Nazarychev, A.N., Novoselov, E.M., Polkoshnikov, D.A., Strakhov, A.S., Skorobogatov, A.A., Pugachev, A.A. *Defektoskopiya*, 2020, no. 5, pp. 3–11.

9. Potapenko, A.O., Yusupova, A.O., Latypov, S.I. *Vestnik YuUrGU. Seriya Energetika*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 62–70.

10. Chuprov, I.I., Suvorov, I.F. Diagnostika i prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnogo elektricheskogo dvigatelya po napryazheniyu vybega [Diagnostics and prediction of the technical condition of an asynchronous electric motor based on run-out voltage]. *Materialy I Vserossiyskoy zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauka i obrazovanie: aktual'nye issledovaniya i razrabotki»* [Proceedings of the I All-Russian virtual scientific-practical conference “Science and Education: current research and development”], 2018, pp. 75–79.

УДК 551.55: 551.556.3

Лейсан Раисовна Гайнуллина

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной экологии и безопасности труда, Россия, Казань, e-mail: gainullina7819@mail.ru

Хассан Фуад Алхадж

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», аспирант кафедры инженерной экологии и безопасности труда, Россия, Казань, e-mail: fouadhajjhassan42@gmail.com

О влиянии неопределенностей на прогнозы ветрового ресурса и выработки электроэнергии

Авторское резюме

Состояние вопроса. Годовое производство энергии ветроэнергетической установки является одним из наиболее важных показателей, определяющих прибыльность проекта ветроэнергетики. Методы, используемые для оценки годового производства энергии ветровой электростанции, требуют учета неопределенностей на всех этапах жизненного цикла проекта. При разработке финансовой модели ветроэнергетического проекта требуется учитывать информацию о неопределенностях в целях уменьшения ошибки и повышения надежности проекта. Специалистами различных стран ведется работа по повышению эффективности ветроэнергетических установок, исследованию ветроэнергетических ресурсов, а также по оценке эффективности их использования. При этом в специальной литературе не уделяется должного внимания проблеме оценки влияния различных неопределенностей на прогнозы ветрового ресурса и выработки электроэнергии.

Материалы и методы. Для расчета неопределенностей предложены два метода: детерминированный метод, основанный на предположении о независимости различных неопределенностей, и метод Монте-Карло, моделирующий поведение физической системы большое количество раз.

Результаты. Рассмотрены неопределенности, которые необходимо учитывать при проектировании ветровой электростанции, представлены диапазоны их изменения. Приведены графики выработки электроэнергии с различным уровнем вероятности достижения или превышения общей неопределенности для трех вариантов. Показано, что учет различных неопределенностей позволяет с повышенной точностью создавать прогноз выработки электроэнергии.

Выводы. Полученные результаты необходимы для разработки модели обработки данных ветроизмерений, позволяющей с повышенной точностью создавать прогноз выработки существующими ВЭС электроэнергии.

Ключевые слова: ветроэнергетика, ветровые электростанции, расчет неопределенностей, метод Монте-Карло, ветроизмерения

Leysan Raisovna Gainullina

Kazan State Energy University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Environmental Engineering and Occupational Safety Department, Russia, Kazan, e-mail: gainullina7819@mail.ru

Hassan Fouad Alhajj

Kazan State Energy University, Postgraduate Student of the Environmental Engineering and Occupational Safety Department, Russia, Kazan, e-mail: fouadhajjhassan42@gmail.com

On the impact of uncertainties on wind resource and power generation forecasts

Abstract

Background. The annual power generation of a wind farm is one of the most important indicators determining the profitability of a wind power project. The methods used to estimate the annual power generation of a wind farm have to consider uncertainties at all stages of the project life cycle. When developing a financial model of a wind power project, it is required to consider information about uncertainties to reduce the error and increase the

reliability of the project. Specialists of various countries are improving the efficiency of wind power plants, studying wind energy resources, as well as assessing the efficiency of their use. However, special studies do not pay due attention to the problem of assessing the impact of various uncertainties on the forecasts of wind resource and power generation.

Materials and methods. Two methods are proposed to calculate uncertainties. They are a deterministic method based on the assumption of independence of various uncertainties, and a Monte Carlo method that simulates the behavior of a physical system many times.

Results. The paper considers the uncertainties to be considered during the design of a wind farm and presents the variation ranges. The authors have presented the plots of power generation with various levels of probability of being reached or exceeded the total uncertainty for three variants. It is shown that considering the various uncertainties allows a power generation forecast to be made with increased accuracy.

Conclusions. The results obtained are necessary to develop a wind measurement data processing model that allows us to forecast electricity generation by existing wind power plants with increased accuracy.

Key words: wind power, wind farms, calculation of uncertainties, Monte Carlo method, wind measurements

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.055-063

Введение. Производство энергии на ветровой электростанции следует стохастическому принципу и требует статистического анализа, в котором оценки производства электроэнергии должны быть связаны с вероятностями событий.

Анализ неопределенностей часто выполняется как часть оценки выработки энергии ветровой электростанции. Экономическая жизнеспособность ветровой электростанции требует анализа рисков, связанных с неопределенностью производства.

Неопределенности развития каждой ветровой электростанции должны определяться индивидуально, а затем рассчитываться для всего проекта. Существует несколько методов, таких как метод IEC (IEC 61400-12 Power Performance Testing), для оценки неопределенности измерения или метод Монте-Карло, которые приводят к различным результатам, связанным с различными процессами [1, 2].

Интересным способом представить неопределенности проекта является указание вероятности ожидаемого годового производства ветровой электростанции [3, 4].

При включении ветроэлектростанции (ВЭС) в энергосистему необходимы гарантии того, что оценка вырабатываемой электрической энергии имеет наименьшую возможную погрешность. В России штраф уплачивается в случае, если выработка электроэнергии ВЭС не соответствует согласованной мощности; превышенная энергия продается по более низкой цене, чем оговоренная¹.

Чтобы снизить риск того, что произведенной энергии будет меньше, чем по контракту, физическая гарантия выработанной энергии ветра должна быть рассчитана с учетом всех источников неопределенностей в проекте, чтобы сертифицированная энергия могла иметь вероятность 90 % (достижение или превышение этого значения). Это значение называется P90 [5, 6].

Экономическая целесообразность производства ветровой энергии в рамках нормативно-правовой базы рынка электроэнергии Российской Федерации возникла из-за необходимости разработки комплекса конкретных правил, направленных на достижение следующих целей:

- минимизировать стоимость энергии поощрением эффективной закупки ветровой энергии, снизить финансовую стоимость проектов, смягчить неопределенность в доходах от продажи энергии;
- снизить риск несоблюдения контрактованного объема энергии.

В соответствии с действующими правилами энергетических аукционов, предприниматели наказываются за производство меньшего количества энергии, чем предусмотрено контрактом с учетом допустимой погрешности.

Снижение неопределенности за счет повышения качества их критериев – единственный способ удержать финансовый риск в приемлемых пределах при условии обеспечения большей безопасности и удовлетворении спроса на энергию.

¹ Постановление от 27 декабря 2010 г. № 1172 «Об утверждении правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности».

Важно определить основные источники неопределенностей в проекте ветровой электростанции, чтобы уменьшить их величину, а затем точно рассчитать их влияние на прогнозы выработки электроэнергии.

Расчет оценочного производства энергии ветровой электростанцией подвержен неопределенностям, которые необходимо учитывать, чтобы оценить риск инвестиций на основе точности расчетного производства энергии [7].

Основная цель проекта состоит в том, чтобы представить основные источники неопределенности в процессе оценки производства энергии, определить ожидаемое улучшение энергетической надежности и снизить финансовые риски проектов ветровых электростанций.

Методы исследования. Существует два метода расчета неопределенностей: детерминированный метод и метод Монте-Карло.

Детерминированный метод основан на предположениях о том, что различные неопределенности независимы и что существует линейная зависимость между входными неопределенностями и выходной неопределенностью. Различные отдельные погрешности суммируются с использованием среднеквадратичного значения. Этот метод позволяет определить величину отдельных неопределенностей.

Метод Монте-Карло для оценки энергетических неопределенностей является стохастическим методом, моделирующим поведение физической системы большое количество раз. При анализе неопределенностей проекта ветровой электростанции эти симуляции производят выходные данные ветровой электростанции, в то время как неопределенности случайным образом варьируются в соответствии с определенным распределением вероятностей. Окончательные оценки неопределенности затем определяются из распределения смоделированных выходных данных. Это допускает нелинейные отношения между различными неопределенностями, поскольку окончательное значение не является результатом суммирования различных неопределенностей [8].

Результаты исследования. Основные источники неопределенностей можно

разделить на две группы: неопределенности ветрового ресурса и неопределенности производства энергии.

Неопределенности ветрового ресурса. Эти неопределенности связаны с ограничениями процесса измерения на метеорологической вышке. В эту группу входят неопределенности (погрешности), связанные с типом датчика, установкой и калибровкой датчиков, расположением вышек и др.

Для превращения неопределенности ветрового ресурса в неопределенность производства энергии требуется коэффициент чувствительности. Коэффициент чувствительности соответствует изменению выработки энергии, вызванному изменением скорости ветра, и является специфическим значением для каждого проекта. Производство энергии и скорость ветра не имеют линейной зависимости.

Точность датчика. Качество результатов измерения напрямую зависит от качества оборудования и способа его установки на метеовышке. Затраты на качественную измерительную систему и ее правильную установку невелики по сравнению со стоимостью ветровой электростанции.

Согласно IEC 61400-12-1 (2005 г.), операционную стандартную неопределенность можно рассчитать по уравнению

$$u_j = (0,05 + 0,005 \cdot u_i) \frac{k}{\sqrt{3}}, \quad (1)$$

где u_i – бин скорости ветра; k – классификационный номер.

Простой диапазон неопределенности относительно скорости ветра, связанный с точностью прибора для изолированного датчика, включает значения примерно от 1 до 6 %².

Калибровка датчика. Одним из важных аспектов, касающихся гарантии качества измерения скорости ветра, является калибровка анемометров в соответствующей аэродинамической трубе [9]. Есть исследования, которые показывают погрешность более 3,5 % от анемометров, калиброванных в различных аэродинамических трубах. По этой причине MEASNET – измерительная сеть институтов ветроэнергетики – предложила метод измерения для калибровки мерных чашечных анемометров, специально разработанных для ветроэнергетики.

² Полтраф: Промышленная автоматика / [официальный сайт]. URL: https://poltraf.ru/nablyudatelnye_stantsii_i_komplekсы/datchiki_skorosti_napravleniya_vetra/datchiki_napravleniya_vetra/skorosti_vetra

Следуя этой практике, MEASNET гарантирует, что используемые аэродинамические трубы не будут отличаться от эталонных по скорости ветра более чем на 0,5 %, и, таким образом, такая процедура обеспечит небольшую и контролируруемую погрешность анемометров, сертифицированных вышеупомянутым методом. В настоящее время подавляющее большинство исследовательских учреждений и учреждений по оценке ветровой энергии требуют, чтобы анемометры имели сертификаты калибровки, выданные учреждениями, имеющими штамп MEASNET, т. е. они соблюдают стандарт калибровки, установленный этим учреждением.

Использование индивидуально калиброванных анемометров оказывает непосредственное влияние на снижение погрешности измерения скорости ветра [9].

Средняя относительная неопределенность калибровки различных моделей чашечных и пропеллерных анемометров представлена в табл. 1.

Таблица 1. Средняя относительная неопределенность

Модель чашечного анемометра	Средняя относительная неопределенность, %
NRG №40	1,48
NRG IF3	1,66
Risoe Cup	1,43
R.M. Young Propeller	0,50
R.M. Young Wind Monitor	0,75
R.M. Young Wind Sentry	1,02
Second Wind C3	1,64
Thies First Class	2,04
Vaisala WAA252	1,98
Vector A100LK	2,06
Vestas Cup	1,09

Неопределенность при установке датчика. Анемометры и датчики направления (флюгеры) должны быть закреплены на башне с помощью жестких стрел, чтобы датчики не подвергались вибрации и, таким образом, измерение данных не подвергалось помехам. Длина установленной стрелы должна соответствовать рекомендациям Международной энергетической

ассоциации (МЭА). Расстояние между мачтой и датчиками должно отражать уровень неопределенности, который считается приемлемым [10].

На рис. 1 и 2 показаны графики скорости с возмущением потока из-за близости к башне.

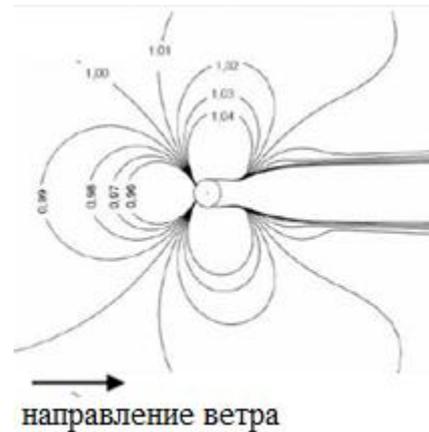


Рис. 1. Вмешательство метеорологической вышки в ветровой поток (трубчатая башня)

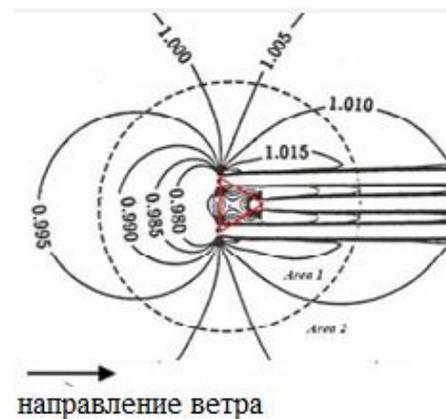


Рис. 2. Вмешательство метеорологической вышки в ветровой поток (треугольная решетчатая башня)

Чтобы свести к минимуму влияние мачты на анемометр, это оборудование должно находиться на минимальном расстоянии от метеорологической мачты и располагаться там, где интерференция изолиний скорости ветра достигает ближайшего к единице значения, используя преобладающее направление ветра в качестве эталона.

Стандартные рекомендации МЭА предписывают для трубчатых мачт погрешность 0,5 %, минимальное расстояние между датчиками и мачтой, равное 8,5 диаметров мачты, измеренному от центра мачты. Для решетчатых башен погрешность составляет

0,5 %, расстояние должно быть не менее чем в 5,7 раза больше диаметра мачты. Однако рекомендуется, чтобы установленная стрела не была намного больше этой меры для уменьшения вибрации [11].

Неопределенность в долгосрочном прогнозе ветра. Ветер имеет стохастический характер, при котором наблюдается значительная межгодовая изменчивость, т.е. средняя скорость ветра может меняться от года к году.

Измерения скорости ветра в короткие периоды (1–3 года) не отражают долгосрочный ветровой ресурс в силу изменчивости.

Следовательно, для правильной оценки местного ветрового потенциала требуются данные за длительный период, чтобы уменьшить ошибку, связанную с изменениями поведения ветра в разные годы. Таким образом, чтобы уменьшить ошибки в оценке производства энергии ветровой электростанцией, выполняется коррекция данных, измеренных на месте, с многолетними данными. Эта поправка улучшает долгосрочную оценку скорости ветра, но также вносит неопределенность в процесс.

Для анализа неопределенности в долгосрочном ветровом прогнозе важно учитывать как исторические данные параметров ветра, так и неопределенность будущей изменчивости ветра.

Неопределенность ретроспективных данных ветровых характеристик связана с корреляцией между целевым участком (данные измерений) и опорной измерительной станцией (долгосрочные данные). Чем слабее корреляция с опорной станцией, тем больше неопределенность скорректированного долгосрочного ветрового ресурса на целевом участке. Некоторые оценки неопределенности корреляции скорости ветра приведены в табл. 2.

Неопределенность будущей изменчивости ветра должна составлять примерно 1,4 % (10 лет) и 2,2 % (25 лет) [12, 13].

Неопределенность в моделировании ветрового потока. Сложность рельефа, местная неровность, наличие препятствий и удаленность турбин от метеорологических вышек входят в число факторов, определяющих величину неопределенностей. Диапазон неопределенностей может быть очень широким и определяется для каждого целевого участка проекта, но типичный диапазон составляет 3–6 %.

Таблица 2. Неопределенность корреляции скорости ветра как функция R^2

Коэффициент корреляции (R^2)	Неопределенность корреляции скорости ветра
> 0,9	< 1 %
0,9–0,8	1–2 %
0,7–0,6	3–5 %

Другие неопределенности. Для повышения точности прогноза при расчетах выработки электроэнергии должны быть приняты во внимание и другие источники неопределенностей ветрового ресурса: неопределенность в вертикальной экстраполяции ветра, в численном моделировании волн, неопределенность в наличии данных о ветре и т.д. [8]

Неопределенность оценки энергии. Неопределенность кривой мощности. Кривая мощности ветровой турбины представляет собой кривую, которая отражает выходную мощность для каждой конкретной скорости ветра и, таким образом, является одним из основных показателей для оценки производства энергии [14]. Однако особенности рельефа могут значительно влиять на выходную мощность турбин. Такие переменные, как турбулентность и топография, могут играть значительную роль в изменении выходной мощности ветровой турбины.

Когда тест измерения мощности проводится производителем в соответствии с международными процедурами, типичная погрешность составляет от 4 до 6 %. Если тест измерения мощности не выполнен, неопределенность кривой мощности может составлять от 8 до 10 % [12].

Существуют и другие неопределенности: неопределенность из-за электрических потерь, неопределенность доступности энергии и т.д.

Выработка энергии и вероятность ее превышения. Для правильной оценки производства энергии в дополнение к оценке неопределенностей проекта важно учитывать все потери энергии, такие как электрические потери, недоступность ветровой турбины, потери в следе и т.д.

После расчета производства энергии и дисконтирования всех потерь энергии получается значение чистой годовой выработки электроэнергии.

Чистая годовая выработка электроэнергии и общая неопределенность определяют, соответственно, среднее значение и стандартное отклонение для нормального распределения Гаусса. Абсолютное стандартное отклонение получается путем умножения общей неопределенности на чистую годовую выработку электроэнергии.

Расчетная чистая годовая выработка электроэнергии представляет собой значение производства энергии, называемое P50, оценку центрального производства энергии в нормальном распределении Гаусса. P50 представляет собой значение энергии с 50 %-ной вероятностью превышения.

Вероятность распределения производства энергии при нормальном Гауссовом распределении определяется выражением

$$f(E) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(E-E_m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

где $f(E)$ – вероятность производства энергии E , %; E_m – среднее нормального распределения Гаусса; σ – абсолютное стандартное отклонение оценки от среднего значения годовой выработки энергии.

Уравнение (2) графически показано на рис. 3 с указанием значения P50.

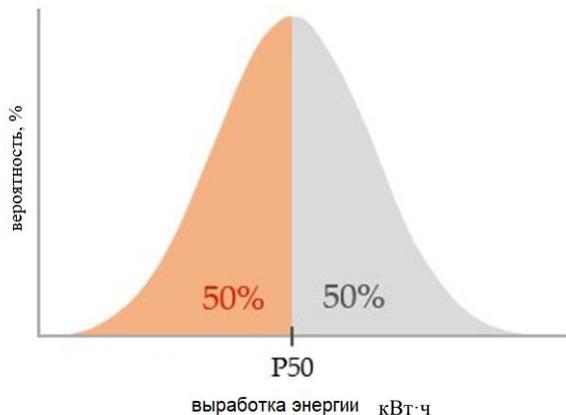


Рис. 3. Вероятность распределения производства энергии при нормальном Гауссовом распределении

Чтобы использовать табличные значения (табл. 3), их необходимо преобразовать в нормальное распределение Гаусса.

Чтобы определить выработку энергии с определенным уровнем вероятности, необходимо использовать таблицы нормального распределения для конкретных вероятностей и соответствующих значений z , определяющих вероятность того, что случайная величина из

стандартного нормального распределения меньше или равна заданному значению.

Расчет чистой выработки электроэнергии с учетом P50 и неопределенностей проекта для желаемой вероятности превышения следует выполнять по следующему уравнению:

$$P_x = P_{50} (1 - z \cdot Uncertainty_{total}), \quad (3)$$

где P_x – чистая выработка энергии до желаемой вероятности превышения; $Uncertainty_{total}$ – общая неопределенность проекта (значение, найденное в таблице вероятностей); значение z зависит от желаемой вероятности.

В табл. 3 приведены значения z для различных уровней вероятности.

Таблица 3. Таблица нормального распределения конкретных вероятностей и соответствующих им значений z

Вероятность превышения, %	z
99	2326
95	1645
90	1282
85	1036
84	1000
80	0,842
75	0,674
50	0
25	0,674
10	1282
1	2326

Важно отметить, что полная неопределенность связана со значением энергии P50. Чистая годовая выработка электроэнергии P90 означает 90 %-ную вероятность достижения или превышения среднего значения годовой выработки энергии.

Рекомендуется, чтобы общая неопределенность проекта составляла около 15 %. Чем выше значение общей неопределенности, тем выше разница между P50 и другими уровнями вероятности превышения [7, 15].

Примеры расчета вероятности превышения. Ниже приведены три примера с одинаковым количеством энергии (P50), но с разными значениями полной неопределенности. Количество выработанной электроэнергии с вероятностями P75 и P90 (вероятность превышения 75 и 90 %) используется для демонстрации влияния общей неопределенности.

Пример 1: P50 120 ГВт·ч/год и общая неопределенность 10 % (табл. 4).

В этом примере значения энергии P75 и P90 соответственно на 7 и 13 % ниже, чем значение энергии P50.

Таблица 4. **Пример 1: P50 120 ГВт·ч/год и общая неопределенность 10 %**

P50, ГВт·ч/год	Неопределенность	P75, ГВт·ч/год	P90, ГВт·ч/год
120	10 %	112	105
Отличие от P50		-7 %	-13 %

На рис. 4 показаны различные уровни вероятности превышения для этого примера.

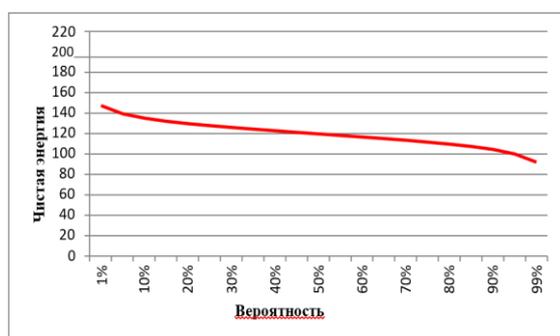


Рис. 4. Вероятность превышения: P50 120 ГВт·ч/год и неопределенность 10 %

Пример 2: P50 120 ГВт·ч/год и общая неопределенность 15 % (табл. 5, рис. 5).

В этом примере значения энергии P75 и P90 соответственно на 10 и 19 % ниже, чем значение энергии P50.

Таблица 5. **Пример 2: P50 120 ГВт·ч/год и общая неопределенность 15 %**

P50, ГВт·ч/год	Неопределенность, %	P75, ГВт·ч/год	P90, ГВт·ч/год
120	15	108	97
Отличие от P50		-10 %	-19 %

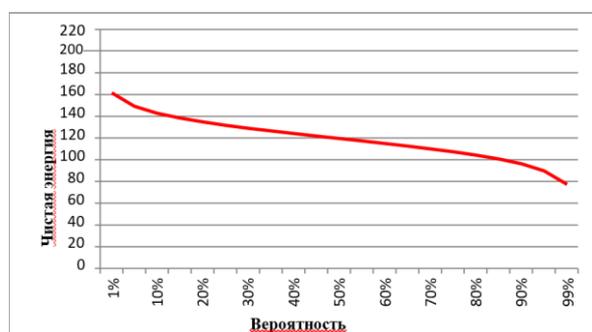


Рис. 5. Вероятность превышения: P50 120 ГВт·ч/год и неопределенность 15 %

Пример 3: P50 120 ГВт·ч/год и общая неопределенность 30 % (табл. 6, рис. 6).

В этом примере значения энергии P75 и P90 соответственно на 20 и 38 % ниже, чем значение энергии P50.

Таблица 6. **Пример 3: P50 120 ГВт·ч/год и общая неопределенность 30 %**

P50, ГВт·ч/год	Неопределенность	P75, ГВт·ч/год	P90, ГВт·ч/год
120	30 %	96	74
Отличие от P50		-20 %	-38 %

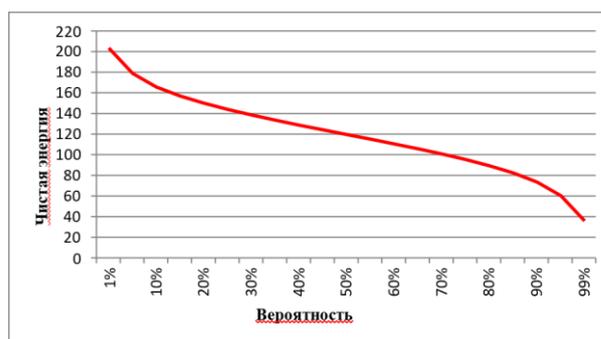


Рис. 6. Вероятность превышения: P50 120 ГВт·ч/год и неопределенность 30 %

Важно правильно определить количество неопределенностей проекта ветроэнергетики, поскольку они могут отражать значительные изменения в производстве энергии. В примерах расчетов выработки электроэнергии для 120 ГВт·ч/год при общей неопределенности 10 % разница между P50 и P90 составляет 15 ГВт·ч/год; при общей неопределенности 15 % разница между P50 и P90 составляет 23 ГВт·ч/год; при общей неопределенности 30 % разница между P50 и P90 составляет 46 ГВт·ч/год.

Выводы. Таким образом, анализ неопределенностей имеет первостепенное значение при оценке экономической жизнеспособности ветроэнергетического проекта.

Дополнительные затраты на точный мониторинг ветра относительно малы по сравнению с инвестициями в проект ветроэнергетики.

Рекомендуется использовать анемометры первого класса, которые должны быть правильно откалиброваны. Наличие нескольких измерительных вышек очень важно для снижения неопределенностей. Максимальное расстояние между предполагаемым расположением турбины и метеорологической вышкой должно быть менее

6 км для равнинной местности и 2 км для сложной местности.

Правильная модель ветрового потока важна для уменьшения неопределенностей. Линейная модель рекомендуется для равнинной местности и нейтральных климатических условий. Для сложной местности обычно рекомендуется модель вычислительной гидродинамики.

Чтобы избежать существенных различий в расчетах энергии от различных независимых сертификационных органов, важно определить стандартную методологию для расчета неопределенностей в производстве энергии на ветровых электростанциях.

Список литературы

1. **Владимирова Л.В., Овсянников Д.А., Рубцова И.Д.** Методы Монте-Карло в прикладных задачах. – СПб.: Изд-во ВВМ, 2015. – 166 с.
2. **Кашникова А.П.** Метод Монте-Карло в задачах моделирования процессов и систем // *Modern Science*. – 2021. – № 1-2. – С. 358–362.
3. **The renewable energy policy Paradox /** B. Jorge, F.B. Rolando, A.B. Carlo, N. Nora // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Т. 82 (Part 1). – P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.002>.
4. **Alhaji Hassan F., Sidorov A.** Study of power system stability: Matlab program processing data from Zahran power plant (Beirut, Lebanon) // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – Т. 1, No. 2. – P. 60–70. DOI:10.28991/HEF-2020-01-02-02.
5. **Practical study on heat pump enhancement by the solar energy /** O. Almohammed, F. Philippova, F. Alhaji Hassan, et al. // *E3S Web of Conferences*. – 2021. – Issue 288. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801069>.
6. **Mestnikov N., Hassan F.A., Alzakkar A.** Study of operation of combined power supply system based on renewable energy in territory of far east of Russia // *International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM)*. – 2021. – P. 114–118. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM51226.2021.9446439>.
7. **Филиппова Т.А., Русина А.Г., Дронова Ю.В.** Модели и методы прогнозирования электроэнергии и мощности при управлении режимами электроэнергетических систем. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 368 с.
8. **Алхадж Хассан Ф., Алали Ш., Гайнуллина Л.Р.** Повышение эффективности ветровых электростанций // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2022. – № 26(2). – С. 217–227. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-217-227>.
9. **Coquilla R.V., Obermeier J.** Calibration Uncertainty Comparisons Between Various Anemometers // *American Wind Energy Association AWEA*, 2008.
10. **Ismail A., Yoshida S.** Aeroelastic analysis for side-booms of a coplanar twin-rotor wind turbine // *International Review of Aerospace Engineering*. – 2020. – Т. 13(4). – P. 135–140. <https://doi.org/10.15866/irease.v13i4.18355>
11. **Alhaji Hassan F.** Multi-criteria Approach and Wind Farm Site Selection Analysis for Improving Power Efficiency // *Journal of Human, Earth, and Future* – 2020. – Т. 1(2) – P. 60–70. DOI: 10.28991/HEF-2020-01-02-02.
12. **Alhaji Hassan F., Mahmoud M., Al-mohammed O.A.M.** Analysis of the Generated Output Energy by Different Types of Wind Turbines // *Journal of Human, Earth, and Future*. – 2020. – Т. 1(4) – P. 181–187. DOI: 10.28991/HEF-2020-01-04-03.
13. **Samokhvalov D.V., Jaber A.I., Almah-turi F.S.** Maximum Power Point Tracking of a Wind-Energy Conversion System by Vector Control of a Permanent Magnet Synchronous Generator // *Russ. Electr. Engin.* – 2021. – Т. 92. – P. 163–168.
14. **Ильичев В.Ю., Шевелев Д.В.** Расчет характеристик мощности ветряных турбогенераторов с применением программного модуля Windpowerlib // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2021. – № 1(47). – С. 23–31.
15. **Возобновляемые источники энергии и смягчение воздействий на изменение климата: специальный доклад межправительственной группы экспертов по изменению климата.** – Женева, 2011. – 215 с.

References

1. Vladimirova, L.V., Ovsyannikov, D.A., Rubtsova, I.D. *Metody Monte-Karlo v prikladnykh zadachakh* [Monte Carlo methods in applied problems]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo VVM, 2015. 166 p.
2. Kashnikova, A.P. Metod Monte-Karlo v zadachakh modelirovaniya protsessov i system [Monte Carlo method in the problems of modeling processes and systems]. *Modern Science*, 2021, no. 1-2, pp. 358–362.
3. Jorge, B., Rolando, F.B., Carlo, A.B., Nora, N. The renewable energy policy Paradox. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 82 (Part 1), pp. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.002>.
4. Alhaji Hassan, F., Sidorov, A. Study of power system stability: Matlab program processing

data from Zahrani power plant (Beirut, Lebanon). *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 1, no. 2, pp. 60–70. DOI: 10.28991/HEF-2020-01-02-02.

5. Almohammed, O., Philippova, F., Alhajj Hassan, F., Timerbaev, N., Fomin, A. Practical study on heat pump enhancement by the solar energy. *E3S Web of Conferences*, 2021, issue 288. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801069>.

6. Mestnikov, N., Hassan, F.A., Alzakkar, A. Study of operation of combined power supply system based on renewable energy in territory of far east of Russia. *International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM)*, 2021, pp. 114–118. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM51226.2021.9446439>.

7. Filippova, T.A., Rusina, A.G., Dronova, Yu.V. *Modeli i metody prognozirovaniya elektroenergii i moshchnosti pri upravlenii rezhimami elektroenergeticheskikh sistem* [Models and methods for forecasting electricity and power in the control of modes of electric power systems]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2009. 368 p.

8. Alkhadzh Khassan, F., Alali, Sh., Gaynulina, L.R. Povyshenie effektivnosti vetrovykh elektrostantsiy [Increasing the efficiency of wind power plants]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2022, no. 26(2), pp. 217–227. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-217-227>.

9. Coquilla, R.V., Obermeier, J. Calibration Uncertainty Comparisons Between Various Anemometers. *In American Wind Energy Association AWEA*, 2008.

10. Ismaiel, A., Yoshida, S. Aeroelastic analysis for side-booms of a coplanar twin-rotor wind

turbine. *International Review of Aerospace Engineering*, 2020, vol. 13(4), pp. 135–140. <https://doi.org/10.15866/irease.v13i4.18355>

11. Alhajj Hassan, F. Multi-criteria Approach and Wind Farm Site Selection Analysis for Improving Power Efficiency. *Journal of Human, Earth, and Future*, 2020, vol. 1(2), pp. 60–70. DOI: 10.28991/HEF-2020-01-02-02.

12. Alhajj Hassan, F., Mahmoud, M., Almohammed, O.A.M. Analysis of the Generated Output Energy by Different Types of Wind Turbines. *Journal of Human, Earth, and Future*, 2020, vol. 1(4), pp. 181–187. DOI: 10.28991/HEF-2020-01-04-03.

13. Samokhvalov, D.V., Jaber, A.I., Almahuri, F.S. Maximum Power Point Tracking of a Wind-Energy Conversion System by Vector Control of a Permanent Magnet Synchronous Generator. *Russ. Electr. Engin.*, 2021, vol. 92, pp. 163–168.

14. Il'ichev, V.Yu., Shevelev, D.V. Raschet kharakteristik moshchnosti vetryanykh turbogeneratorov s primeneniem programmnoy modulya Windpowerlib [The calculation of power characteristics of wind turbine generators using the software module Windpowerlib]. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2021, no. 1(47), pp. 23–31.

15. Vozobnovlyaemye istochniki energii i smyagchenie vozdeystviy na izmenenie klimata [Renewable Energy and Climate Change Mitigation]. *Spetsial'nyy doklad mezhpriatel'stvennoy gruppy ekspertov po izmeneniyu klimata* [Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change]. Zheneva, 2011. 215 p.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.165

Алексей Евгеньевич Барочкин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Методология матричного моделирования многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических комплексов

Авторское резюме

Состояние вопроса. Традиционно задачи теплопередачи решаются применительно к двухпоточным системам, в которых теплообмен осуществляется между горячим и холодным теплоносителями. Однако наряду с двухпоточными системами нередко встречаются многопоточные системы, в которых число потоков теплоносителей составляет три и более. Кроме этого, каждый поток энергоносителя может состоять из нескольких компонентов, а установка может включать в себя несколько ступеней. Разработка универсальных подходов и методов моделирования, расчета и оптимизации многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических комплексов в рамках единой методологии является актуальной научной и практической задачей.

Материалы и методы. Методология матричной формализации моделирования тепло- и массообменных процессов базируется на методах и подходах матричного описания тепло- и массообменных систем в энергетических комплексах.

Результаты. Обобщены подходы и методы моделирования энергетических установок. В рамках матричной методологии описания сформулированы правила и подходы к разработке моделей тепло-массообменных процессов применительно к многокомпонентным многопоточным многоступенчатым энергетическим комплексам. Предложено решение обратных задач с учетом и без учета возможного фазового перехода в теплоносителях.

Выводы. Анализ сформулированных и решенных задач в рамках предложенной методологии позволяет рекомендовать использование методов и подходов матричного моделирования оборудования для решения прямых и обратных задач многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических комплексов различного назначения.

Ключевые слова: методология матричного моделирования, многокомпонентные многопоточные многоступенчатые энергетические комплексы, матричные модели, матричная формализация, баланс энергии, баланс массы, обратная задача, прямая задача

Alexey Evgenievich Barochkin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Methodology of matrix modeling of multicomponent multiflow multi-stage energy complexes

Abstract

Background. Traditionally, heat transfer problems are solved in relation to two-flow systems in which heat exchange is carried out between hot and cold coolants. However, along with two-flow systems, there are often multiflow systems in which the number of coolant flows is three or more. In addition, each energy carrier stream may consist of several components, and the installation may include several stages. Thus, the development of universal approaches and methods for modeling, calculation, and optimization of multi-component multiflow multistage energy complexes within the framework of a unified methodology is an urgent scientific and practical task.

Materials and methods. A methodology of matrix formalization of modeling heat and mass transfer processes is based on methods and approaches of matrix description of heat and mass transfer systems in energy complexes.

Results. The approaches and methods of modeling energy power installations are summarized. Within the framework of the matrix description methodology, the rules and approaches to the development of models of heat and mass transfer processes are formulated in relation to multicomponent multiflow multistage energy complexes. The authors have proposed a solution to the inverse problems with and without considering a phase transition in coolants.

Conclusions. Analysis of formulated and solved problems within the framework of the proposed methodology allows us to recommend the use of methods and approaches of matrix modeling of equipment to solve direct and inverse problems for multicomponent multiflow multistage energy complexes for various purposes.

Key words: methodology of matrix modeling, multicomponent multiflow multistage energy complexes, matrix models, matrix formalization, energy balance, mass balance, inverse problem, direct problem

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.064-070

Эффективное функционирование, развитие и совершенствование энергетических теплообменных систем, включающих большое число подсистем и связей между ними, во многом сдерживается отсутствием методов расчета и современных компьютерных комплексов, позволяющих адекватно прогнозировать состояние таких систем во всем диапазоне нагрузок оборудования [1–10]. Традиционно задачи теплопередачи решаются применительно к двухпоточным системам, в которых теплообмен осуществляется между горячим и холодным теплоносителями. Однако наряду с двухпоточными системами нередко встречаются многопоточные системы, в которых число потоков теплоносителей составляет три и более. К таким установкам можно отнести пластинчатые и спиральные теплообменные аппараты, конденсаторы теплофикационных турбин со встроенными пучками, контактные аппараты, градирни, многоступенчатые испарительные установки и конденсационные котлы. Кроме этого, каждый поток энергоносителя может состоять из нескольких компонентов. Под компонентами в данном случае понимают

ся различные фазовые состояния одного вещества (например, вода и пар) или разные компоненты смеси, отличающиеся физическими или химическими свойствами (крупностью зерен для сыпучих материалов или разными температурами кипения смеси жидкостей). Для проведения теплотехнических расчетов с такими смесями обычно выполняется усреднение значений теплофизических параметров компонентов. Однако в ряде технологий на основе различия теплофизических свойств, в частности различия температур кипения компонентов, реализуются процессы по разделению этих компонентов, например при перегонке или ректификации продуктов в пищевой и нефтехимической промышленности. В этом случае именно различия в теплофизических свойствах компонентов необходимо учитывать при расчете теплообменных процессов.

Разработка новых общих подходов и методов моделирования многокомпонентных многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратов, использование этих подходов и методов для определения мероприятий, обеспечивающих эффектив-

ное функционирование энергетических систем [11–15], являются актуальной задачей, стоящей перед энергетикой и смежными отраслями промышленности.

Целью исследования является повышение эффективности функционирования многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических систем и установок путем их моделирования, расчета и оптимизации.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Разработка обобщенной методологии матричного математического описания процессов формирования энерго- и массопотоков в многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических установках.

2. Постановка и решение прямых и обратных задач процессов тепломассообмена в многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических системах и комплексах в рамках предложенной методологии.

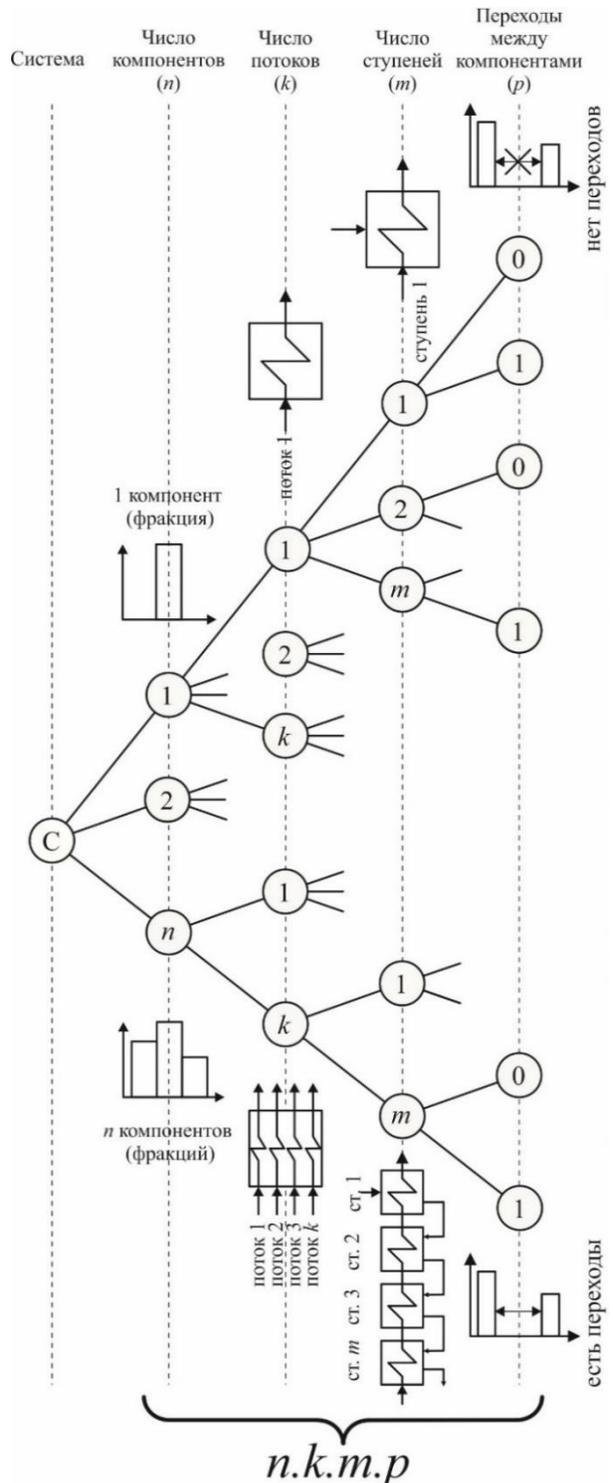
Под методологией в узком смысле слова понимается совокупность процедур, приемов и методов, объединенных в единую конструктивную программу и служащих средствами для постижения того или иного объекта научного знания [16].

Под методологией матричного моделирования тепломассообмена в данном случае понимается совокупность процедур, приемов и методов матричного описания тепломассообменных устройств различного назначения.

По способу использования математических моделей в инженерной практике, следует выделять прямые и обратные задачи [11–12]. Прямые задачи обычно ориентированы на проведение поверочных расчетов, при выполнении которых предполагается подбор оборудования из стандартного ряда при фиксированных конструктивных параметрах и проверяются возможности использования этого оборудования для конкретного случая. В обратных задачах на основе математической модели реализуются, как правило, проектные расчеты, которые ориентированы на выбор конструктивных и режимных параметров, обеспечивающих эффективную работу оборудования.

Большое количество исследований тепломассообмена в сложных энергетических установках представлены в отечествен-

ных и зарубежных публикациях [1–10, 12]. Для эффективного анализа задач тепломассообмена в многокомпонентных многопоточных многоступенчатых технологических системах предложена система классификации и кодификации задач, представленная на рисунке.



Классификация и кодификация систем тепломассообмена по числу ступеней, числу потоков, числу компонентов и возможности перехода между компонентами (фракциями) теплоносителей

Представленная система кодификации построена следующим образом. Код состоит из чисел, разделенных точками: первое слева число кода показывает количество компонентов, второе – количество потоков, третье – количество ступеней, а четвертое – наличие (1) или отсутствие (0) возможного перехода между компонентами. Например, код задачи 1.1.1.0 показывает, что моделируемая система однокомпонентная однопоточная одноступенчатая при отсутствии возможных переходов между компонентами. Код 1.2.1.0 соответствует задаче описания однокомпонентных двухпоточных одноступенчатых систем, код 1.2.*m*.0 – однокомпонентных двухпоточных многоступенчатых (*m* ступеней) систем. Предложенная система классификации и кодификации позволяет более четко определить класс задачи и ориентироваться в степени ее изученности.

Общие принципы построения моделей в рамках матричной методологии моделирования рассмотрим и прокомментируем на ряде примеров постановок задач и их решений, которые выполнены в рамках предложенной методологии. Часть задач сформулирована и решена с участием автора, постановка других задач снабжена ссылками на литературные источники, часть задач намечена для решения в дальнейших исследованиях, что во многом стало возможным благодаря предложенной системе классификации.

Задача матричного моделирования двухпоточных одноступенчатых систем (задача моделирования четырехполюсника) (код 1.2.1.0) подробно представлена в [8, 12]. Уравнения теплопередачи первоначально записываются в виде системы двух дифференциальных уравнений, а их решения представляются в матричном виде [8]:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{X}_0, \quad (1)$$

где $\mathbf{X} = [t_1 \ t_2]'$ – матрица-столбец размера 2×1 искомых параметров; $\mathbf{X}_0 = [t_{10} \ t_{20}]'$ – матрица-столбец размера 2×1 заданных параметров; t – температура; индекс 1 относится к горячему теплоносителю, 2 – к холодному теплоносителю, 0 – к начальным условиям; верхний индекс ' означает транспонирование матрицы; $\mathbf{A} = \{a_{ij}\}$, $i = \overline{1,2}$;

$j = \overline{1,2}$ – матрица размера 2×2 известных коэффициентов [12].

Для заданных значений температур теплоносителей на входе в ступень уравнение (1) позволяет определить параметры теплоносителей на выходе ступени согласно выражению

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{X}_0, \quad (2)$$

где возведение матрицы в степень (-1) соответствует обращению матрицы.

При наличии фазового перехода в одном или обоих теплоносителях также удастся представить модель ступени в матричном виде, аналогичном (1). Однако при наличии фазового перехода состояние теплоносителя описывается степенью его превращения или степенью сухости, при этом температура теплоносителя считается постоянной. Уравнения (1) и (2) показывают типичный пример представления модели в рамках методологии матричной формализации. Большинство рассматриваемых ниже моделей удастся представить в аналогичном матричном виде, при этом размер и выражения для коэффициентов матриц для разных моделей соответственно различаются.

Задача матричного моделирования трехпоточных одноступенчатых систем (задача моделирования шестиполюсника) (код 1.3.1.0). Выше представлено решение задачи матричного описания двухпоточных теплообменных аппаратов, ступень которых имеет вид четырехполюсника с двумя входными и двумя выходными потоками. Однако число потоков на входе или выходе реального аппарата может быть больше двух. На практике в теплообменные аппараты, помимо двух основных потоков холодного и горячего теплоносителей, часто направляются дополнительные потоки, обусловленные дренированием, продувкой или аварийными режимами системы. Подача перечисленных потоков теплоносителей может производиться в разные точки теплообменного аппарата, что обуславливает разную эффективность анализируемых процессов. В рамках методологии матричной формализации удалось получить описание трехпоточной ступени аппарата аналогично уравнению (1) [12], а его решение – в виде (2). Матрица \mathbf{A} для двухпоточной ступени теплообмена имеет размер 2×2 , а для трехпоточной – 3×3 эле-

мента. Полученные решения для трехпоточной ступени позволили проанализировать зависимость эффективности теплообмена от направления движения трех потоков. Для трехпоточной ступени возможны 4 варианта организации потоков [12]. Схема с противотоком между первым и вторым и прямотоком между вторым и третьим теплоносителями оказалась наиболее эффективной схемой движения потоков с точки зрения максимального теплосъема с горячего теплоносителя.

Задача матричного моделирования четырехпоточных одноступенчатых систем (задача моделирования восьмиполюсника) (код 1.4.1.0). Аналогично полученным выше решениям для двухпоточных и трехпоточных ступеней записывается решение для четырехпоточной ступени теплообмена [12]. При этом модель и ее решение в матричном виде представляются аналогично уравнениям (1)–(2), в этом случае меняются соответственно размер и элементы матриц, которые подробно представлены в [12]. Получено решение модели для четырехпоточной ступени теплообменника для восьми возможных вариантов движения теплоносителей относительно друг друга. В качестве критерия эффективности теплообмена при сопоставлении схем движения выбрана температура горячего теплоносителя на выходе. Найдено оптимальное сочетание направлений движения четырех потоков. Выполненный расчетный анализ показал, что наиболее эффективная схема организации движения потоков противоток–прямоток–прямоток, которая позволяет обеспечить минимальное значение температуры горячего теплоносителя на выходе аппарата при минимальном значении площади поверхности теплообмена.

Задача моделирования многоступенчатых систем произвольной структуры, каждая ступень которой представлена четырехполюсником (код 1.2.m.0). Тепловые схемы станций и сложные теплообменные аппараты представляются в данном случае многоступенчатой системой, каждая ступень которой моделируется четырехполюсником, при этом связь между ступенями описывается матрицами коммутаций, структура которых подробно комментируется в [8]. Итоговая матричная модель опять сводится к виду (1), матрица \mathbf{A} имеет размер $2m \times 2m$, где

m – число ступеней. Предложенная матричная модель позволяет в рамках единого подхода проводить расчетный анализ многоступенчатых систем и подсистем энергетических установок в целях определения условий их эффективного функционирования и оптимизации режимов оборудования ТЭС.

Задача моделирования многоступенчатых сложных систем, каждая ступень которых имеет произвольное число входных и выходных потоков (код 1.n.m.0). Выполненный анализ показал, что метод матричной формализации для сложных структур тепломассообменных систем для ступени в виде четырехполюсника нуждается в обобщении на случай произвольного числа входных и выходных потоков ступени. Каждая ступень сложной системы теплообменных аппаратов на ТЭС может иметь произвольное число потоков на входе и на выходе ступени. Для описания таких систем получено матричное описание в виде, аналогичном (1). Порядок использования и возможности предложенного подхода продемонстрированы на примере четырехступенчатой трехпоточной системы теплообменных аппаратов, для которой получены и проанализированы решения модели [12].

Задача моделирования многопоточных энергетических систем. В рамках методологии матричной формализации разработана модель паротурбинной установки и единый подход к математическому описанию ТЭС как многопоточной энергетической системы с учетом модели подсистемы конденсационной установки [15]. На примере модели паротурбинной установки в рамках этого подхода получены и проанализированы решения модели для построения энергетических характеристик теплофикационного турбоагрегата, выполнено сравнение результатов расчета с энергетическими характеристиками действующего турбоагрегата, показана достоверность и обоснованность предложенного подхода. В результате учета модели подсистемы конденсационной установки в расчетной модели паротурбинной установки [15] удалось уменьшить средние относительные погрешности с 10–15 % до 0,6 %.

Задача моделирования многоступенчатых систем тепломассообмена с учетом скользящей границы фазового перехода. Предметом исследования на

данном этапе является математическая модель процесса тепломассообмена при противоточном движении теплоносителей в многопоточном теплообменнике при скользящей границе фазового перехода. Новая модель была получена на основании тепловых балансов на элементарном участке теплообмена для описания процессов в контактном экономайзере [14]. Для утилизации влаги из дымовых газов необходим перевод водяных паров в жидкое состояние. Многопоточность теплообменного аппарата в данном случае обуславливается наличием как минимум трех теплоносителей: сухие дымовые газы, водяные пары и охлаждающая вода. В контактных экономайзерах часто реализуется противоточная схема движения теплоносителей. Вода струями или в виде пленки стекает сверху вниз, а смесь дымовых газов и водяных паров подается снизу и движется навстречу охлаждающей воде. Сложность моделирования усугубляется возможным изменением положения границы начала фазового перехода при изменении нагрузки или режима работы установки. Решение описанной задачи, полученное в рамках матричной методологии, подробно представлено в [14].

Решение обратной задачи теплопередачи для двухпоточных одноступенчатых теплообменных аппаратов без фазового перехода в теплоносителях. Предметом исследований является метод решения обратной задачи теплопередачи в многопоточных теплообменных аппаратах без учета фазового перехода в теплоносителях. Предложенное математическое описание многопоточных теплообменных аппаратов в виде системы линейных дифференциальных уравнений, найденное аналитическое решение в виде зависимости температуры теплоносителей вдоль поверхности нагрева записаны в виде четырех линейных уравнений в матричном виде, что позволило получить решения для шести возможных вариантов задания исходных данных для задач проектирования аналогичных установок [14].

Решение обратной задачи теплопередачи для трехпоточных одноступенчатых теплообменных аппаратов без фазового перехода в теплоносителях. Представлена постановка и решение обратной задачи теплопередачи для трехпоточных теплообменных аппаратов без учета фазового перехода в теплоносителях.

Возможности подхода продемонстрированы на примере контактных многопоточных теплообменников, используемых для утилизации влаги и тепловой энергии дымовых газов котельных установок [14]. В качестве греющих потоков теплоносителей в данных аппаратах рассматриваются дымовые газы и водяные пары, в качестве нагреваемого потока – охлаждающая вода.

Выводы. Расширение и обобщение представленной актуализированной версии методологии матричной формализации моделирования тепломассообменных систем обусловлено включением в нее новых подходов и методов решения представленных прямых и обратных задач с учетом и без учета возможного фазового перехода в теплоносителях. Решения прямых и обратных задач в рамках разработанной расширенной методологии матричной формализации моделирования тепломассообменных процессов для ступени двухпоточной, трехпоточной и четырехпоточной системы и системы, включающей произвольное число ступеней с произвольным числом входных и выходных потоков теплоносителей, позволяют определить актуальные для рассматриваемых условий технологические параметры.

Список литературы

1. Бродов Ю.М., Савельев Р.З. Конденсационные установки паровых турбин. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.
2. Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Энергетические характеристики оборудования ТЭС. – Иваново, 2014. – 232 с.
3. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 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. Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М. Теплообменные аппараты ТЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 288 с.
6. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.
7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.
8. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических тепломассообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
9. Бажан П.И., Каневец Г.М., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. – М.: Машиностроение, 1989. – 366 с.

10. Берман С.С., Михеева И.М. Расчет теплообменных аппаратов турбоустановок. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.

11. Матричный метод решения обратной задачи теплопередачи в теплообменных аппаратах / В.П. Жуков, А.Е. Барочкин, М.С. Боброва и др. // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 2. – С. 62–69.

12. Жуков В.П., Барочкин Е.В., Барочкин А.Е. Анализ многопоточных тепло-массообменных систем. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 160 с.

13. Барочкин А.Е. Матричный метод при моделировании многокомпонентных и многопоточных энергетических систем и установок ТЭС // Проблемы региональной энергетики. – 2021. – № 4(52). – С. 59–67.

14. Барочкин А.Е. Матричный метод решения обратной задачи теплопередачи в контактных аппаратах с учетом фазового перехода в теплоносителях // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 5. – С. 68–75.

15. Барочкин А.Е. Матричное моделирование и оптимизация паротурбинных установок // Энергосбережение и водоподготовка. – 2022. – № 6(140). – С. 52–59.

16. Ожегов С.И. Словарь русского языка. – М.: Советская энциклопедия, 1973. – 846 с.

References

1. Brodov, Yu.M., Savel'ev, R.Z. *Kondensatsionnye ustanovki parovykh turbin* [Condensing installations of steam turbines]. Moscow: Energoatomizdat, 1994. 288 p.

2. Ledukhovskiy, G.V., Pospelov, A.A. *Energeticheskie kharakteristiki oborudovaniya TES* [Energy characteristics of thermal power plant equipment]. Ivanovo, 2014. 232 p.

3. Ryzhkin, V.Ya. *Teplovye elektricheskie stantsii* [Thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 328 p.

4. Martynenko, O.G. (red.) *Spravochnik po teploobmennikam: v 2 t., t. 1* [Handbook of heat exchangers in 2 vols., vol. 1]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 560 p.

5. Nazmeev, Yu.G., Lavygin, V.M. *Teploobmennye apparaty TES* [Heat exchange devices of thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 288 p.

6. Isachenko, V.P. *Teploobmen pri kondensatsii* [Heat transfer during condensation]. Moscow: Energiya, 1977. 240 p.

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

8. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass transfer installations]. Ivanovo, 2009. 176 p.

9. Bazhan, P.I., Kanevets, G.M., Seliverstov, V.M. *Spravochnik po teploobmennym apparatam* [Handbook on heat exchangers]. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 366 p.

10. Berman, S.S., Mikheeva, I.M. *Raschet teploobmennykh apparatov turboustanovok* [Calculation of heat exchangers of turbine units]. Moscow: Energiya, 1973. 320 p.

11. Zhukov, V.P., Barochkin, A.E., Bobrova, M.S., Belyakov, A.N., Shuvalov, S.I. *Matrichnyy metod resheniya obratnoy zadachi teploperedachi v teploobmennykh apparatakh* [Matrix method for solving the inverse problem of heat transfer in heat exchangers]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 2, pp. 62–69.

12. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Barochkin, A.E. *Analiz mnogopotochnykh teplomassoobmennykh sistem* [Analysis of multi-flow heat and mass exchange systems]. Vologda: Infra-Inzheneriya, 2024. 160 p.

13. Barochkin, A.E. *Matrichnyy metod pri modelirovanii mnogokomponentnykh i mnogopotochnykh energeticheskikh sistem i ustanovok TES* [Matrix method for modeling multi-component and multi-flow energy systems and thermal power plant installations]. *Problemy regional'noy energetiki*, 2021, no. 4(52), pp. 59–67.

14. Barochkin, A.E. *Matrichnyy metod resheniya obratnoy zadachi teploperedachi v kontaktnykh apparatakh s uchetom fazovogo perekhoda v teplonositelyakh* [Matrix method for solving the inverse problem of heat transfer in contact devices taking into account the phase transition in coolants]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 5, pp. 68–75.

15. Barochkin, A.E. *Matrichnoe modelirovanie i optimizatsiya paroturbinnnykh ustanovok* [Matrix modeling and optimization of steam turbine plants]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2022, no. 6(140), pp. 52–59.

16. Ozhegov, S.I. *Slovar' russkogo yazyka* [Dictionary of the Russian language]. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1973. 846 p.

УДК 621.039.516

Владимир Константинович Семенов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-15, e-mail: semenov_vk@mail.ru

Наталья Борисовна Иванова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат физико-математических наук, доцент кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-15, e-mail: rgr_ivanova@rambler.ru

Ирина Игоревна Черняева

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент 4 курса кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-15, e-mail: chernyaeva0880@yandex.ru

Применение принципа Понтрягина для оптимального отключения энергетического ядерного реактора

Авторское резюме

Состояние вопроса. Теория оптимального управления базируется на двух подходах – методе динамического программирования (уравнение Беллмана) и принципе максимума Понтрягина. Последний нашел применение в физике ядерных реакторов при оптимизации различных переходных процессов. Математическое обоснование этой теории базируется на элементах выпуклого анализа, который не используется физиками и инженерами, так что физическая сторона дела мало описана в литературе.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования с использованием аналитического и численного методов рассматривается энергетический ядерный реактор типа ВВЭР, для которого решается задача минимизации времени его отключения в обход йодной ямы с возможностью включения реактора на мощность в любой произвольный момент после его остановки.

Результаты. Рассматривается пример применения принципа максимума для оптимального управления процессом отключения ядерного реактора в обход йодной ямы. На физическом уровне строгости сформулирована математическая модель принципа Понтрягина. Обоснован и рассчитан процесс оптимального управления отключением реактора при большом и малом запасе реактивности.

Выводы. Принцип Понтрягина не содержит алгоритма нахождения оптимизационного процесса, составляющие этапы процесса должны выбираться на основе физических соображений, но эти этапы должны удовлетворять указанному принципу. Результаты исследования позволили на основе принципа Понтрягина составить поэтапный план действий при отключении реактора типа ВВЭР с любым значением запаса реактивности с последующим его включением в любой момент времени после окончания переходного процесса, что позволяет избежать простоя. Предложенный план может быть использован как при математическом моделировании переходных процессов в реакторе, так и в системах управления реактором для повышения его управляемости и, как следствие, повышения безопасности.

Ключевые слова: энергетический ядерный реактор, оптимальное управление ядерным реактором, математическая модель, принцип максимума Понтрягина, йодная яма, отравление реактора ксеноном

Vladimir Konstantinovich Semenov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-15, e-mail: semenov_vk@mail.ru

Natalia Borisovna Ivanova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, (PhD), Associate Professor of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-15, e-mail: rgr_ivanova@rambler.ru

Irina Igorevna Chernyaeva

Ivanovo State Power Engineering University, Student of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-15, e-mail: chernyaeva0880@yandex.ru

Application of Pontryagin principle for optimal shutdown of a nuclear power reactor

Abstract

Background. The theory of optimal control is based on two approaches, the dynamic programming method (Bellman equation) and Pontryagin maximum principle. Pontryagin maximum principle is applied in the physics of nuclear reactors when optimizing various transient processes. The mathematical justification of this theory is based on the elements of convex analysis, which is not used by physicists and engineers, so the physical issues are less studied in scientific literature.

Materials and methods. The subject of the study is a nuclear power reactor of the WWER type. The problem of minimizing its shutdown time, bypassing the iodine pit is solved and it is possible to start up the reactor at any moment after its shutdown. Analytical and numerical methods are used.

Results. The paper considers an example of applying the maximum principle for optimal control of the process of shutting down a nuclear reactor bypassing the iodine pit. A physical mathematical model of the Pontryagin principle is formulated. The process of optimal control of reactor shutdown for large and small reactivity margins is justified and calculated.

Conclusions. Pontryagin principle does not contain an algorithm to find an optimization process; the stages of the process must be selected based on physical considerations, but these stages must satisfy the specified principle. Based on the Pontryagin principle, the results of the study make it possible to draw up a step-by-step action plan when shutting down a WWER-type reactor with any value of the reactivity margin and its switching is possible at any time after the transition process, which avoids downtime. The proposed plan can be used both in mathematical modeling of transient processes in a reactor and in reactor control systems to improve its controllability and, consequently, to improve safety.

Key words: nuclear power reactor, optimal control of a nuclear reactor, mathematical model, Pontryagin maximum principle, iodine pit, xenon poisoning of the reactor, step-by-step action plan

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.071-077

Введение. Применение теории оптимального управления на основе принципа Понтрягина в ядерной физике, и в частности при анализе ксеноновых переходных процессов в ядерном реакторе, начато в работах А.П. Рудика и его соавторов [1–3]. На основе разработанного ими подхода в работе других авторов приведены результаты численного исследования оптимального режима снижения мощности реактора [4], однако алгоритм расчета ими не описан. Если положение двух начальных точек смены управления реактора очевидно, то поиск места нахождения на фазовых диаграммах двух других точек смены управления реактора на конечной стадии переходного процесса требует специального обоснования. Ниже предложен простой численный метод нахождения этих точек.

Методы исследования. Теория оптимального управления, разработанная советским математиком Л.С. Понтрягиным и его школой, нашла широкое применение при управлении ракетами, решении различных технических задач автоматического регулирования, а также в экономике, ядерной физике и других областях науки и техники [5–14]. В частности, она применяется при

решении задач оптимизации различных режимов ядерных реакторов [1–3]. Обоснование этой теории базируется на элементах выпуклого анализа, который не используется физиками и инженерами, поэтому этот принцип необходимо сформулировать на физическом уровне строгости [15], т. е. на языке, понятном физикам и инженерам.

Суть принципа оптимального управления заключается в решении вариационной задачи, которая в одномерном случае имеет следующий вид:

$$J(x, u) = \int_0^T f_0(x(t), u(t)) dt = \min, \quad (1)$$

где $J(x, u)$ – минимизируемый функционал; $f_0(x(t), u(t))$ – целевая функция; $x(t)$ – зависимость минимизируемого процесса от времени; $u(t)$ – управляющий процессом параметр.

Процесс $x(t)$ подчиняется закону

$$\frac{dx}{dt} = f_1(x, u), \quad (2)$$

а на управление $u(t)$ наложено ограничение $u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}$.

Наличие ограничений на управляющий параметр говорит о несостоятельности классического вариационного исчисления

для решения данной задачи и требует поиска нового подхода для ее решения. Рассмотрим этот подход ниже.

Определим вариацию минимизируемого функционала

$$\delta J = \int_0^T \left(\frac{\partial f_0}{\partial u} \delta u + \frac{\partial f_0}{\partial x} \delta x \right) dt = 0. \quad (3)$$

Вариации δx и δu связаны между собой. Учтем эту связь, используя уравнение (2):

$$\frac{d\delta x}{dt} = \frac{\partial f_1}{\partial u} \delta u + \frac{\partial f_1}{\partial x} \delta x. \quad (4)$$

Выберем вспомогательную функцию $\Psi_1(t)$ так, чтобы она удовлетворяла следующему уравнению:

$$\frac{d\Psi_1}{dt} + \Psi_1 \frac{\partial f_1}{\partial x} = \frac{\partial f_0}{\partial x}. \quad (5)$$

Умножим уравнение (4) на $\Psi_1(t)$ и сложим его с уравнением (5), умноженным на δx . После элементарных преобразований получим

$$\frac{d}{dt} (\Psi_1 \delta x) - \Psi_1 \frac{\partial f_1}{\partial u} \delta u = \frac{\partial f_0}{\partial x} \delta x. \quad (6)$$

Подставляя полученное уравнение в соотношение (3), получим

$$\delta J = - \int_0^T \left(- \frac{\partial f_0}{\partial u} + \Psi_1 \frac{\partial f_1}{\partial u} \right) \delta u dt + \Psi_1 \delta x \Big|_0^T = 0. \quad (7)$$

Знак минус перед интегралом говорит о том, что, в отличие от выражения (1), определяется не минимум, а максимум функционала.

Введем в рассмотрение функцию $H(x(t), u(t)) = \Psi_0 f_0 + \Psi_1 f_1$, где $\Psi_0 = -1$. Очевидно, что мы можем записать следующие соотношения:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \psi_1}, \quad \frac{d\psi_1}{dt} = - \frac{\partial H}{\partial x}, \quad (8)$$

т.е. мы пришли к известным в механике уравнениям Гамильтона для функции $x(t)$ и сопряженной ей функции $\Psi_1(t)$. Теперь вариацию δJ можно будет записать следующим образом:

$$\delta J = - \int_0^T \frac{\partial H}{\partial u} \delta u dt + \Psi_1 \delta x \Big|_0^T = 0. \quad (9)$$

Следует подчеркнуть, что условие (9) является условием максимума функции Гамильтона H в требуемом диапазоне управляющего параметра, при этом управляющий параметр является кусочно-непрерывной функцией времени (в точках переключения функция имеет разрыв), а гамильтониан – непрерывной. Если искомый максимум (экстремум)

гамильтониана лежит внутри указанного диапазона управляющего параметра, то $\frac{\partial H}{\partial u} = 0$. Если максимум гамильтониана находится за пределами указанного диапазона, то $\delta u = 0$. В любом случае интеграл в условии (9) равен нулю.

В задаче должны быть заданы краевые условия при $t = 0$ и $t = T$. Эти условия могут касаться либо закона процесса $x(t)$, либо сопряженной функции $\Psi_1(t)$. Если максимум функционала найден и $\delta J = 0$, то, учитывая, что интеграл в условии (9) тоже равен нулю, необходимо потребовать, чтобы $\Psi_1(0) = 0$ и $\Psi_1(T) = 0$ для любых значений δx . Кроме того, краевые условия для функций $x(t)$ и $\Psi_1(t)$ могут быть заданы в комбинации. В частности, во многих задачах вариационного исчисления известно условие для $x(0)$, а условие для $x(T)$ неизвестно, вместо него задается условие $\Psi_1(T) = 0$ (так называемая задача Больца).

Обобщим вышеизложенное на задачу с двумя равноправными переменными $x_1(t)$ и $x_2(t)$. В этом случае оптимизируемый процесс подчиняется двум уравнениям:

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1(x_1, x_2, u), \quad \frac{dx_2}{dt} = f_2(x_1, x_2, u), \quad (10)$$

при этом гамильтониан и уравнения (7)–(9) имеют следующий вид:

$$H = \Psi_0 f_0 + \Psi_1 f_1 + \Psi_2 f_2; \quad (11)$$

$$\delta J = - \int_0^T \frac{\partial H}{\partial u} \delta u dt + (\Psi_1 \delta x + \Psi_2 \delta x) \Big|_0^T = 0; \quad (12)$$

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \psi_1}; \quad \frac{d\psi_1}{dt} = - \frac{\partial H}{\partial x_1}; \quad (13)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \psi_2}; \quad \frac{d\psi_2}{dt} = - \frac{\partial H}{\partial x_2}. \quad (14)$$

Будем иметь в виду задачу Больца, т.е. при $t = 0$ заданы $x_1(0)$ и $x_2(0)$, а на втором краю выполняется условие

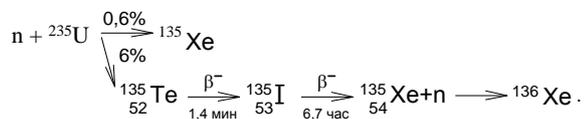
$$(\Psi_1 \delta x_1 + \Psi_2 \delta x_2) \Big|_T = 0, \quad (15)$$

называемое в вариационном исчислении условием трансверсальности. Сформулированных уравнений (10)–(15) достаточно для решения изложенной ниже задачи об оптимальном отключении ядерного реактора.

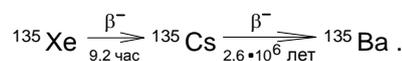
Результаты исследования. Покажем, как на основе применения принципа Понтрягина составить поэтапный план действий при отключении энергетического реактора типа ВВЭР за минимальное время с

последующим его включением в любой момент времени после окончания переходного процесса.

Работа реактора осуществляется за счет цепной реакции в ядерном топливе под действием нейтронов, рождающихся в ходе той же реакции. Процесс размножения нейтронов характеризуется коэффициентом размножения, равным отношению числа нейтронов в данном поколении к их числу в предшествующем поколении. Для удобства описания вводится понятие реактивности реактора ρ , равное отношению приращения числа нейтронов за время жизни поколения к числу нейтронов в данном поколении. В процессе работы реактора выгорает топливо, т.е. снижается запас реактивности, образуются шлаки, делящиеся нуклиды (плутоний) и яды. К ядам относятся радиоактивные вещества, поглощающие нейтроны. Примером такого яда является ксенон. По модели ядерных оболочек ксенону не хватает одного нейтрона для укомплектования последней оболочки, т.е. он обладает большим сечением поглощения нейтронов и тем самым значительным образом влияет на реактивность реактора. Рождение ксенона происходит по двум каналам:



Второй канал рождения ксенона является основным, поэтому будем рассматривать только его. Поскольку период полураспада теллура мал, то его во внимание принимать не будем. Гибель ксенона идет по следующей радиоактивной цепочке:



Итак, процесс отравления реактора характеризуется двумя уравнениями рождения и гибели для йода и ксенона. Эти уравнения представим в безразмерном виде:

$$\frac{dx_1}{dt} = U - \lambda_1 x_1, \quad (16)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \lambda_1 x_1 - (U + \lambda_2) x_2, \quad (17)$$

где x_1 и x_2 – концентрации йода и ксенона соответственно; $U = \frac{\phi}{\phi_{\max}}$ – управляющий параметр, равный отношению плотности нейтронного потока ϕ к его максимальному значению ϕ_{\max} ; λ_1 и λ_2 – безразмерные постоянные распада йода и ксенона соответственно.

Масштабами времени и концентрации являются величины $M_t = \frac{1}{\sigma_2 \phi_{\max}}$ и

$$M_N = \frac{\gamma \Sigma_f}{\sigma_2}, \text{ где } \sigma_2 \text{ – микросечение поглощения нейтронов ксеноном; } \Sigma_f \text{ – макросечение деления урана; } \gamma \text{ – выход йода при делении.}$$

При отключении стационарно работающего реактора происходит накопление ксенона за счет радиоактивного распада йода и снижение реактивности реактора за счет отравления ксеноном. Отравление ксеноном P_{Xe} определяется отношением макросечения ксенона Σ_{Xe} к макросечению урана

Σ_U : $P_{Xe} = \frac{\Sigma_{Xe}}{\Sigma_U} = \frac{\sigma_2 x_2 M_N}{\Sigma_U}$. Если отравление P_{Xe} превысит запас реактивности реактора $\rho_{\text{запаса}}$, то реактор попадет в режим вынужденной стоянки (йодная яма) на время распада йода и ксенона, которое составляет от полутора до двух суток. На рис. 1 приведен пример йодной ямы при $\rho_{\text{запаса}} = 0,1$.

Если отравление P_{Xe} превысит запас реактивности реактора $\rho_{\text{запаса}}$, то реактор попадет в режим вынужденной стоянки (йодная яма) на время распада йода и ксенона, которое составляет от полутора до двух суток. На рис. 1 приведен пример йодной ямы при $\rho_{\text{запаса}} = 0,1$.

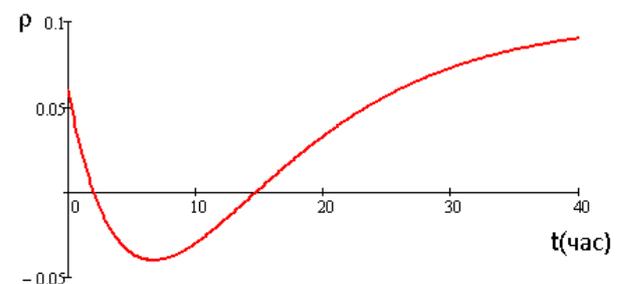


Рис. 1. Зависимость реактивности реактора ρ от времени при вынужденной стоянке

В связи с этим возникает вопрос об отключении реактора за минимальное время с возможностью его включения в работу в любой момент после остановки, причем продолжительность остановки заранее неизвестна. Эта задача, относящаяся к оптимальному управлению, вместе с уравнениями (16) и (17) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} H = W + UV, \\ W = \psi_0 - \psi_1 \lambda_1 x_1 + \psi_2 (\lambda_1 x_1 - \lambda_2 x_2), \\ V = \psi_1 - \psi_2 x_2, \\ f_0 = 1, \\ 0 \leq U \leq 1, \\ \frac{d\psi_1}{dt} = \psi_1 \lambda_1 - \psi_2 \lambda_1, \\ \frac{d\psi_2}{dt} = \psi_2 \lambda_2 + U \psi_2. \end{cases} \quad (18)$$

Естественно, возникает и другой вопрос: позволяет ли приведенная система уравнений найти оптимальную траекторию процесса отключения реактора? Ответ отрицательный. План действий отключения должен задаваться исследователем, он должен состоять из допустимых переходных процессов реактора, но при этом удовлетворять принципу Понтрягина.

В соответствии со структурой гамильтониана, допустимыми ксеноновыми переходными процессами являются следующие [12, 13]:

- включение реактора на мощность ($U = 1, V > 0$);
- отключение реактора ($U = 0, V < 0$);
- работа реактора при постоянном значении концентрации ксенона, определяемой запасом реактивности реактора;
- отключение реактора ($U = 0$) при максимуме концентрации ксенона, определяемой запасом реактивности реактора;
- управление реактором, определяемое условием $\frac{\partial H}{\partial U} = V = 0$, полученным на основе классического вариационного исчисления.

Процессы, из которых может быть составлен план действий, рассмотрим на фазовой диаграмме, представляющей зависимость концентрации ксенона от концентрации йода (рис. 2, 3). Процесс накопления йода и ксенона в реакторе, работающем на мощности, обозначен на рисунках кривой 1. Процесс отключения реактора характеризуется кривой 2, причем максимальная концентрация ксенона определяется мощностью, на которой работал реактор до отключения, и она никак не связана с запасом реактивности реактора. Конечной кривой, на которую нужно перевести реактор, является кривая 3, максимум ксенона на этой кривой определяется запасом реактивности реактора. Конечная точка переходного процесса

должна лежать правее и ниже точки максимума кривой 3.

Если у реактора большой запас реактивности (рис. 2, точка D пересечения кривых 1 и 3 лежит правее точки B), то план действий будет состоять из двух этапов: отключения реактора в точке A с переводом его в точку B и включения реактора на мощность с переходом на кривую отключения 3 в точку D. В первом примере (рис. 2) при $\rho_{запаса} = 0,1$ расчетное время переходного процесса составило 7,13 часа при продолжительности ямы 37,3 часа.

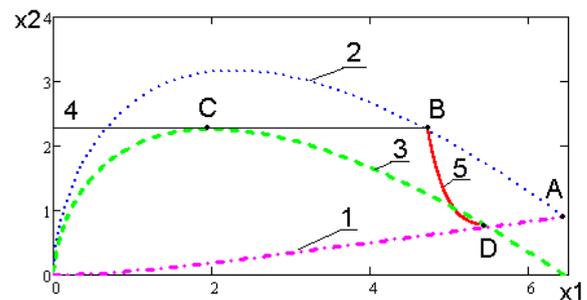


Рис. 2. Фазовая диаграмма процессов при большом запасе реактивности: x_1 – концентрация йода; x_2 – концентрация ксенона; 1 – реактор на мощности; 2 – отключение реактора; 3 – отключение реактора при запасе реактивности, равном отравлению; 4 – процесс с постоянной концентрацией ксенона; 5 – включение реактора на мощность

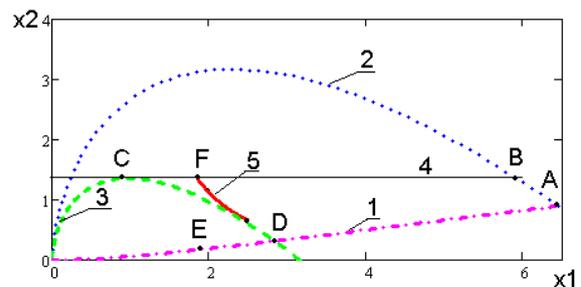


Рис. 3. Фазовая диаграмма оптимизации при малом запасе реактивности: x_1 – концентрация йода; x_2 – концентрация ксенона; 1 – реактор на мощности; 2 – отключение реактора; 3 – отключение реактора при запасе реактивности, равном отравлению; 4 – процесс с постоянной концентрацией ксенона; 5 – включение реактора на мощность

Если запас реактивности мал (рис. 3, точка D пересечения кривых 1 и 3 лежит левее точки B), то потребуется еще один процесс перехода из точки B по линии BC в точку F, находящуюся левее точки D. Этот переход выполняется переключением

управления с $U_1 = 0$ на $U_2 = \frac{\lambda_1 x_1(t)}{x_{2m}} - \lambda_2$, при

этом концентрация ксенона остается постоянной. Точка переключения F и точка E перехода на кривую 3 должны определяться на основе сшивки решений, соответствующих трем разным переходным процессам, и подчиняющихся уравнениям (16)–(18), однако эти точки проще определить численным методом стрельбы [16], т.е. на линии BC левее точки D следует подобрать такую точку, при переключении управления в которой на $U_3 = 1$ кривая включения коснется кривой 3.

Итак, в случае малого запаса реактивности переходный процесс носит трехступенчатый характер с переключением управления в точке B с U_1 на U_2 и переключением управления в точке пристрелки F с U_2 на U_3 . При принятом во втором примере (рис. 3) запасе реактивности 0,06 продолжительность переходного процесса составила 24 часа при продолжительности ямы 40 часов.

Выводы. Применение принципа Понтрягина с использованием анализа физических процессов отравления реактора ксеноном позволяет построить план действий при отключении ядерного реактора в обход йодной ямы и избежать простоя реактора.

Список литературы

1. Рудик А.П. Ядерные реакторы и принцип Понтрягина. – М.: Атомиздат, 1971.
2. Рудик А.П. Ксеноновые переходные процессы в ядерных реакторах. – М.: Атомиздат, 1974.
3. Рудик А.П. Физические основы ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1979.
4. Десятков В.М., Павлов В.И., Симонов В.Д. Расчетное исследование оптимального режима снижения мощности реактора // Атомная энергия. – 1976. – Т. 40, Вып. 6. – С. 464.
5. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – М.: Наука, 1983.
6. Понтрягин Л.С. Принцип максимума. – М.: Фонд математического образования и просвещения, 1998.
7. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. – М.: Наука, 1969.
8. Бушуев А.Ю. Введение в оптимальное управление: электронное учебное издание. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
9. Методы классической и современной теории автоматического управления / под ред.

К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

10. Арутюнов А.В., Магарил-Ильяев Г.Г., Тихомиров В.М. Принцип максимума Понтрягина. – М.: Факториал Пресс, 2006.
11. Дикусар В.В., Милютин А.А. Качественные и численные методы в принципе максимума. – М.: Наука, 1989.
12. Милютин А.А. Принцип максимума в общей задаче оптимального управления. – М.: Физматлит, 2001.
13. Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управление. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
14. Васильев Ф.П. Методы оптимизации. – М.: Факториал Пресс, 2002.
15. Методы математической физики: I. Основы комплексного анализа. II. Элементы вариационного исчисления и теории обобщенных функций / В.Г. Багров, В.В. Белов, В.Н. Задорожный, А.Ю. Трифонов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2002.
16. Калиткин Н.Н. Численные методы: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011.

References

1. Rudik, A.P. *Yadernye reaktory i printsip Pontryagina* [Nuclear reactors and the Pontryagin principle]. Moscow: Atomizdat, 1971.
2. Rudik, A.P. *Ksenonovye perekhodnye protsessy v yadernykh reaktorakh* [Xenon transients in nuclear reactors]. Moscow: Atomizdat, 1974.
3. Rudik, A.P. *Fizicheskie osnovy yadernykh reaktorov* [Physical foundations of nuclear reactors]. Moscow: Atomizdat, 1979.
4. Desyatov, V.M., Pavlov, V.I., Simonov, V.D. *Raschetnoe issledovanie optimal'nogo rezhima snizheniya moshchnosti reaktora* [Computational study of the optimal mode of reactor power reduction]. *Atomnaya energiya*, 1976, vol. 40, issue 6, p. 464.
5. Pontryagin, L.S., Boltyanskiy, V.G., Gamkrelidze, R.V., Mishchenko, E.F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [Mathematical theory of optimal processes]. Moscow: Nauka, 1983.
6. Pontryagin, L.S. *Printsip maksimuma* [Maximum principle]. Moscow: Fond matematicheskogo obrazovaniya i prosveshcheniya, 1998.
7. Boltyanskiy, V.G. *Matematicheskie metody optimal'nogo upravleniya* [Mathematical methods of optimal control]. Moscow: Nauka, 1969.
8. Bushuev, A.Yu. *Vvedenie v optimal'noe upravlenie* [Introduction to optimal control]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU imeni N.E. Baumana, 2014.
9. Pupkova, K.A., Egupova, N.D. (ed.) *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classical and modern theory of automatic control]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana, 2004.

10. Arutyunov, A.V., Magaril-Il'yaev, G.G., Tikhomirov, V.M. *Printsip maksimuma Pontryagina* [Pontryagin's maximum principle]. Moscow: Faktorial Press, 2006.

11. Dikumar, V.V., Milyutin, A.A. *Kachestvennye i chislennye metody v printsipe maksimuma* [Qualitative and numerical methods are in principle maximum]. Moscow: Nauka, 1989.

12. Milyutin, A.A. *Printsip maksimuma v obshchey zadache optimal'nogo upravleniya* [The maximum principle in the general problem of optimal control]. Moscow: Fizmatlit, 2001.

13. Alekseev, V.M., Tikhomirov, V.M., Fomin, S.V. *Optimal'noe upravlenie* [Optimal Control]. Moscow: FIZMATLIT, 2005.

14. Vasil'ev, F.P. *Metody optimizatsii* [Optimization methods]. Moscow: Faktorial Press, 2002.

15. Bagrov, V.G., Belov, V.V., Zadorozhnyy, V.N., Trifonov, A.Yu. *Metody matematicheskoy fiziki: I. Osnovy kompleksnogo analiza. II. Elementy variatsionnogo ischisleniya i teorii obobshchennykh funktsiy* [Methods of mathematical physics: I. Fundamentals of complex analysis. II. Elements of the calculus of variations and the theory of generalized functions]. Tomsk: Izdatel'stvo NTL, 2002.

16. Kalitkin, N.N. *Chislennye metody* [Numerical methods]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011.

УДК: 66.011:681.51

Александр Николаевич Лабутин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», доктор технических наук, профессор кафедры технической кибернетики и автоматике, Россия, Иваново, e-mail: lan@isuct.ru

Анатолий Алексеевич Андреев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», студент, Россия, Иваново, телефон (4932) 32-72-26

Елена Александровна Шуина

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой высшей математики, Россия, Иваново, e-mail: HM_ISPU@mail.ru

Юлия Николаевна Пономарева

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», аспирант кафедры технической кибернетики и автоматике, Россия, Иваново, телефон (4932) 32-72-26

Сравнительный анализ вариантов построения алгоритмов управления температурой в химическом реакторе

Авторское резюме

Состояние вопроса. В условиях повышенной потребности к качеству и эффективности систем управления объектами различной природы, например химическими реакторами, целесообразно применение принципа управления по вектору состояния, а не исключительно по выходной координате. Использование современных методов синтеза алгоритмов управления наталкивается на трудности, связанные с многомерностью и нелинейностью объектов, с параметрической неопределенностью моделей и неполной измеримостью вектора состояния.

Материалы и методы. Для синтеза алгоритмов управления температурой в химическом реакторе использованы метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов и метод модального управления на базе регулятора состояния. Проблема неполной измеримости вектора состояния решена путем декомпозиции – редукции модели объекта.

Результаты. Синтезированы два нелинейных алгоритма управления температурой методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов и два алгоритма на базе регулятора состояния с использованием редуцированной линеаризованной модели объекта. Исследованы свойства инвариантности, ковариантности и робастности системы управления с различными алгоритмами путем моделирования системы управления с использованием исходной нелинейной модели объекта.

Выводы. Нелинейный алгоритм с интегральной составляющей, синтезированный методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов, демонстрирует наилучшие показатели качества переходных процессов управления.

Ключевые слова: химический реактор, нелинейный многомерный объект, аналитическое конструирование агрегированных регуляторов, модальное управление, регулятор состояния

Alexander Nikolaevich Labutin

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Technical Cybernetics and Automation Department, Russia, Ivanovo, e-mail: lan@isuct.ru

Anatoly Alekseevich Andreenkov

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Student, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 32-72-26

Elena Alexandrovna Shuina

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor, Head of Higher Mathematics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: HM_ISPU@mail.ru

Yulia Nikolaevna Ponomareva

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Postgraduate Student of Technical Cybernetics and Automation Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 32-72-26

Comparative analysis of options for temperature control algorithms design in a chemical reactor

Abstract

Background. In conditions of increased demand for the quality and efficiency of control systems for objects of various nature, for example, chemical reactors, it is advisable to apply the principle of state vector control, and not only the principle of output coordinate control. Application of modern methods of synthesis of control algorithms encounters difficulties associated with the multidimensionality and nonlinearity of objects, the parametric uncertainty of models and noncomplete measurability of the state vector.

Materials and methods. To synthesize the temperature control algorithms in a chemical reactor, the method of analytical design of aggregated regulators and the method of modal control based on a state controller have been used. The problem of noncomplete measurability of the state vector has been solved by decomposition, reduction of the object model.

Results. The authors have synthesized two nonlinear algorithms of temperature control using the method of the analytical design of aggregated regulators and two algorithms based on state controller using a reduced linearized object model. The properties of invariance, covariance, and robustness of the control system with various algorithms are investigated by modeling the control system using the initial nonlinear model of the object.

Conclusions. The best quality indicators of transient control processes are demonstrated by a nonlinear algorithm with an integral component synthesized by the method of analytical design of aggregated regulators.

Key words: chemical reactor, nonlinear multidimensional object, analytical design of aggregated regulators, modal control, state controller

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.078-086

Введение. Одной из проблем современной прикладной теории управления является аналитический синтез алгоритмов управления многомерными нелинейными объектами в условиях неполной информации о значениях параметров моделей и возможности измерения переменных состояния в реальном масштабе времени [1–3]. Данная задача особенно актуальна на ранних стадиях интегрированного проектирования объекта (технологического процесса) и системы управления при повышенных требованиях к показателям качества процесса управления и робастности алгоритмов [4–5].

Модель объекта управления, как правило, задается в пространстве состояний в форме нелинейной или линеаризованной системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Учитывая изложенное и современные достижения (результаты) прикладной теории управления [1, 4, 6, 8], можно сделать заключение, что целесообразно применение принципа управления по вектору состояния. Реализовать этот принцип предлагается двумя способами: синтез алгоритма управления методом аналитическо-

го конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) с использованием исходной нелинейной модели объекта и синтез алгоритма на базе регулятора состояния (РС) с использованием линеаризованной модели.

Ниже ставится и решается задача синтеза и анализа альтернативных алгоритмов управления температурой в жидкофазном химическом реакторе при отсутствии измерений концентраций компонентов реакции в реальном масштабе времени.

Математическое описание и анализ объекта управления. Объектом управления является жидкофазный химический реактор емкостного типа, в котором реализуется двухстадийная экзотермическая реакция:



где A и B – исходные реагенты; P_1 – целевой продукт; P_2 – побочный продукт; k_1, k_2 – константы скоростей стадий.

В реактор емкостного типа с механической мешалкой объемом V подаются исходные компоненты отдельными потоками. Смесь из реактора забирается насосом. Режим работы реактора политропический (политермический). Для отвода тепла

и стабилизации температуры в реакторе аппарат снабжен рубашкой, в которую поступает хладагент.

Математическая модель динамики объекта при допущении о постоянстве уровня имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{d\tau} &= f_1(\cdot) = \frac{1}{V} [v_1 C_{\text{Авх}} - (v_1 + v_2)x_1 + \\ &+ V(-k_1 x_1 x_2 - k_2 x_1 x_3)]; \\ \frac{dx_2}{d\tau} &= f_2(\cdot) = \frac{1}{V} [v_2 C_{\text{Бвх}} - (v_1 + v_2)x_2 + V(-k_1 x_1 x_2)]; \\ \frac{dx_3}{d\tau} &= f_3(\cdot) = \frac{1}{V} [-(v_1 + v_2)x_3 + V(k_1 x_1 x_2 - k_2 x_1 x_3)]; \\ \frac{dx_4}{d\tau} &= f_4(\cdot) = \frac{1}{V} [v_1 t_1 + v_2 t_2 - (v_1 + v_2)x_4 - \\ &- \frac{\beta}{\rho c_T} (x_4 - x_5) + \frac{V}{\rho c_T} (k_1 x_1 x_2 \Delta H_1 + k_2 x_1 x_3 \Delta H_2)]; \\ \frac{dx_5}{d\tau} &= f_5(\cdot) = \frac{1}{V_{\text{хл}}} [v_{\text{хл}} (t_{\text{хлвх}} - x_5) + \frac{\beta}{\rho_{\text{хл}} c_{\text{хл}}} (x_4 - x_5)], \end{aligned} \quad (1)$$

где $x_i|_{\tau=0} = x_i^0$ – значения переменных в стационаре; x_1, x_2, x_3 – концентрации веществ А, В, Р₁; x_4, x_5 – температура реакционной смеси и хладагента в рубашке соответственно; v_1, v_2 – расходы потоков исходных компонентов; $C_{\text{Авх}}, C_{\text{Бвх}}$ – концентрации исходных компонентов; V – объем смеси в реакторе; $V_{\text{хл}}$ – объем хладагента в рубашке; t_1, t_2 – температуры входных потоков; $t_{\text{хлвх}}$ – температура хладагента на входе в аппарат; $v_{\text{хл}}$ – расход хладагента на входе и выходе из аппарата; ρ и c_T – плотность и теплоемкость смеси в реакторе; $\rho_{\text{хл}}$ и $c_{\text{хл}}$ – плотность и теплоемкость хладагента в рубашке; ΔH_i ($i = 1, 2$) – тепловой эффект соответствующей стадии реакции; β – параметр теплообмена; $k_i = k_{i0} \exp\left(-\frac{E_i}{R(273 + x_4)}\right)$, $i = 1, 2$, – температурная зависимость констант скоростей; E_i – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная.

Исходя из требований к содержанию побочного продукта Р₂ в реакционной смеси при заданной нагрузке на аппарат по исходным реагентам были определены режимно-технологические и конструктивные параметры процесса в стационарном установившемся режиме функционирования объекта: $V = 10 \text{ м}^3$; $v_1 = 0,3 \text{ м}^3/\text{мин}$; $v_2 = 0,7 \text{ м}^3/\text{мин}$; $C_{\text{Авх}} = 20 \text{ кмоль}/\text{м}^3$;

$C_{\text{Бвх}} = 10 \text{ кмоль}/\text{м}^3$; $k_{10} = 1,5 \cdot 10^9 \text{ м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{мин})$; $k_{20} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{мин})$; $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_2 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$; $E_i = 66520 \text{ кДж}/\text{кмоль}$; $\Delta H_1 = 65000 \text{ кДж}/\text{кмоль}$; $\Delta H_2 = 60000 \text{ кДж}/\text{кмоль}$; $\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{хл}} = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$; $c_T = 4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$; $t_{\text{хл}}^{\text{вх}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $V_{\text{хл}} = 5,8 \text{ м}^3$; $v_{\text{хл}} = 1,18 \text{ м}^3/\text{мин}$; $\beta = 3530 \text{ кДж}/\text{град} \cdot \text{мин}$; $x_1^0 = 0,829 \text{ кмоль}/\text{м}^3$; $x_2^0 = 2,51 \text{ кмоль}/\text{м}^3$; $x_3^0 = 3,808 \text{ кмоль}/\text{м}^3$; $x_4^0 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$; $x_5^0 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача управления химическим реактором заключается в стабилизации температуры смеси в аппарате на заданном значении $x_4 = x_4^{\text{зад}}$ в условиях действия возмущений или в отслеживании задающего воздействия $x_4^{\text{зад}}$ при переводе объекта с одного режима на другой. В качестве управляющего воздействия выступает расход хладагента $u = \Delta v_{\text{хл}}$.

В целях исследования общесистемных свойств объекта (устойчивости, управляемости и наблюдаемости) осуществлена линеаризация математической модели в окрестности стационарного положения.

В общем виде линеаризованная математическая модель запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\bar{x}}{d\tau} &= A\Delta\bar{x} + Bu, \\ y &= C\Delta\bar{x}, \Delta\bar{x}|_{\tau=0} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Delta\bar{x} = (\Delta x_1 \ \Delta x_2 \ \Delta x_3 \ \Delta x_4 \ \Delta x_5)^T$ – вектор состояния; $u = \Delta v_{\text{хл}}$ – управление; A, B – матрицы состояния и управления; y – выходная переменная (Δx_4); C – матрица выхода.

При заданных выше значениях технологических параметров матрицы A, B и C запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} A &= \{a_{ij}\} = \\ &= \begin{bmatrix} -0,722 & -0,178 & -0,018 & -0,033 & 0 \\ -0,54 & -0,278 & 0 & -0,029 & 0 \\ 0,458 & 0,178 & -0,118 & 0,024 & 0 \\ 9,569 & 2,772 & 0,256 & 0,325 & 0,084 \\ 0 & 0 & 0 & 0,146 & -0,349 \end{bmatrix}; \\ B &= \{b_i\} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -4,31 \end{bmatrix}; \quad C = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1], \end{aligned}$$

где $a_{ij} = \partial f_i / \partial x_j|_{x^0}$; $b_i = \partial f_i / \partial u|_{x^0}$; $i, j = \overline{1, 5}$.

Собственные числа матрицы A (корни характеристического полинома $\det(I s - A) = 0$): $s_{1,2} = -0,367 \pm 0,182i$; $s_{3,4} = -0,154 \pm 0,014i$; $s_5 = -0,1$.

Все собственные числа имеют отрицательные вещественные части, следовательно, объект обладает свойством устойчивости положения равновесия [4]. Для исследования свойства управляемости объекта в пространстве состояний построена и вычислена матрица управляемости:

$$M_u = [B : AB : A^2B : A^3B : A^4B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,012 & -0,011 & 0,006 \\ 0 & 0 & 0,01 & -0,01 & 0,006 \\ 0 & 0 & -0,009 & 0,009 & -0,005 \\ 0 & -0,364 & 0,009 & 0,096 & -0,079 \\ -4,31 & 1,505 & -0,578 & 0,203 & -0,057 \end{bmatrix}.$$

Ранг матрицы M_u равен 4, следовательно, объект не обладает свойством полной управляемости в пространстве состояний, поэтому управление всем вектором переменных состояния невозможно.

В связи с неизмеримостью концентраций компонентов проведено исследование свойства наблюдаемости объекта в пространстве состояний – построена и вычислена матрица наблюдаемости:

$$M_n = [C^T : A^T C^T : (A^T)^2 C^T : (A^T)^3 C^T : (A^T)^4 C^T] = \begin{bmatrix} 0 & 9,569 & -3,783 & 0,663 & 0,227 \\ 0 & 2,772 & -1,127 & 0,209 & 0,061 \\ 0 & 0,256 & -0,08 & 0,006 & 0,009 \\ 1 & 0,471 & -0,276 & 0,085 & -0,01 \\ 1 & -0,265 & 0,132 & -0,069 & 0,031 \end{bmatrix},$$

Ранг матрицы M_n равен 4, следовательно, объект не обладает свойством наблюдаемости в пространстве состояний. В силу отсутствия управляемости и наблюдаемости объекта для синтеза алгоритма управления температурой требуется провести декомпозицию – редукцию математической модели.

Синтез алгоритмов управления.

Задача редукции исходной нелинейной модели (1)–(2) решается следующим образом. Запишем математическую модель тепловой подсистемы:

$$\begin{aligned} \frac{dx_4}{dt} &= f_4 + \frac{\beta_1}{V} x_5 + \Delta Q_p, \\ \frac{dx_5}{dt} &= f_5 + \frac{t_{хлвх} - x_5}{V_{хл}} \Delta V_{хл}, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$f_4 = \frac{1}{V} [v_1 t_1 + v_2 t_2 - (v_1 + v_2) x_4 - \beta_1 x_4 + V Q_p^0];$$

$$f_5 = \frac{1}{V_{хл}} [v_{хл} (t_{хлвх} - x_5) + \beta_2 (x_4 - x_5)]; \quad \beta_1 = \frac{\beta}{\rho C_T};$$

$$\beta_2 = \frac{\beta}{\rho_{хл} C_{хл}}.$$

Влияние химической подсистемы на тепловую учитывается наличием в правой части уравнения теплового баланса двух слагаемых: $Q_p^0 = \frac{1}{\rho C_T} (k_1 x_1^0 x_2^0 \Delta H_1 + k_2 x_1^0 x_3^0 \Delta H_2)$ – тепловыделение в стационарном состоянии; $\Delta Q_p = \Delta Q_p(\Delta x_i)$ – отклонение тепловыделения, обусловленное изменением концентраций веществ.

Синтез алгоритма управления методом АКАР для каскадно-связанной системы управления тепловым режимом аппарата приведен в [9]. Модель тепловой подсистемы в [9] совпадает с моделью (4), за исключением величины

$$Q_p^0 = \frac{1}{\rho C_T} (k_1 x_1^0 x_2^0 \Delta H), \text{ так как в [9] рассмат-}$$

ривалась реакция $A + B \xrightarrow{k_1} P_1$. Полученный нелинейный закон управления температурой имеет вид

$$u_2 = \Delta v_{хл} = - \frac{V_{хл}}{(t_{хлвх} - x_5)} \times \left(\frac{1}{T_2} \left[x_5 + \frac{V}{T_1 \beta_1} (x_4 - x_4^{\text{зад}}) + \frac{f_4 V}{\beta_1} \right] + f_5 \right), \quad (5)$$

где $x_4^{\text{зад}}$ – заданное значение температуры в реакторе; $T_1 > 0$ и $T_2 > 0$ – параметры настройки регулятора, уточняемые в процессе моделирования ($T_1 = 5$ мин, $T_2 = 0,567$ мин).

Для того чтобы ввести интегральную составляющую в алгоритм (5), расширим математическую модель объекта (4) путем введения дополнительной переменной состояния z , подчиняющейся уравнению

$$\dot{z} = (x_4 - x_4^{\text{зад}}) \quad (z = \int_0^{\infty} (x_4 - x_4^{\text{зад}}) \cdot dt).$$

Астатический алгоритм управления температурой имеет вид

$$u_2 = \Delta v_{\text{хл}} = -\frac{V_{\text{хл}}}{(t_{\text{хлвх}} - x_5)} \left(\frac{1}{T_2} \left[x_5 + \frac{V}{\beta_1} \left(\frac{1}{T_1} + \gamma \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (x_4 - x_4^{\text{зад}}) + \frac{V}{\beta_1} \frac{\gamma}{T_1} z + \frac{f_4 V}{\beta_1} \right] + f_5 \right), \quad (6)$$

где $T_1 = 2,941$ мин, $T_2 = 0,567$ мин, $\gamma = 0,3$ – настроечные параметры.

Закон управления (6) отличается от (5) коэффициентом при пропорциональной составляющей ($x_4 - x_4^{\text{зад}}$) и наличием интегральной составляющей z . При $\gamma = 0$ соотношение (6) переходит в (5).

Для решения задачи синтеза алгоритма на базе РС проведем декомпозицию полной линеаризованной модели (3) на химическую и тепловую подсистемы. Модель тепловой подсистемы имеет следующий вид:

$$\frac{d\Delta x_4}{d\tau} = a_{41}\Delta x_1 + a_{42}\Delta x_2 + a_{43}\Delta x_3 + \\ + a_{44}\Delta x_4 + a_{45}\Delta x_5, \quad (7)$$

$$\frac{d\Delta x_5}{d\tau} = a_{54}\Delta x_4 + a_{55}\Delta x_5 + b\Delta v_{\text{хл}}.$$

Предполагается, что в системе (7) приращения переменных состояния $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$, (концентраций веществ) обусловлены отклонением температуры процесса от статического значения (Δx_4), что приводит к изменению констант скоростей. Учитывая, что, согласно модели (1), $x_i = x_i(k_j(x_4))$, $i = \overline{1,3}$, $j = 1,2$, можно записать

$$\Delta x_i = \left(\sum_{j=1}^2 \frac{\partial x_i}{\partial k_j} \cdot \frac{\partial k_j}{\partial x_4} \right) \Big|_{\bar{x}^0} \cdot \Delta x_4 = d_i \Delta x_4, \quad i = \overline{1,3}. \quad (8)$$

Подставив (8) в первое уравнение (7), получим линеаризованную модель тепловой подсистемы в следующем виде:

$$\frac{d\Delta x_4}{d\tau} = a'_{44} \Delta x_4 + a_{45} \Delta x_5, \quad (9)$$

$$\frac{d\Delta x_5}{d\tau} = a_{54} \Delta x_4 + a_{55} \Delta x_5 + b \Delta v_{\text{хл}},$$

где $a'_{44} = a_{41}d_1 + a_{42}d_2 + a_{43}d_3 + a_{44}$.

Численные значения параметров $a_{45}, a_{54}, a_{55}, b$ определены в результате линеаризации исходной модели. Оценку параметра a'_{44} можно получить следующим образом. С использованием полной линеаризованной модели (3) строится кривая разгона по каналам $\Delta v_{\text{хл}} \rightarrow \Delta x_4$ и $\Delta v_{\text{хл}} \rightarrow \Delta x_5$ при вы-

бранном значении $\Delta v_{\text{хл}}$. Подставив вычисленные установившиеся значения температур Δx_4^{yc} и Δx_5^{yc} в модель статики системы (9), вычислим a'_{44} . Полученная таким образом редуцированная модель запишется в следующем виде:

$$\frac{d\Delta x_4}{d\tau} = -0,124\Delta x_4 + 0,084\Delta x_5, \quad (10)$$

$$\frac{d\Delta x_5}{d\tau} = 0,146\Delta x_4 - 0,349\Delta x_5 - 4,31\Delta v_{\text{хл}}.$$

Матрицы A, B и C редуцированной модели будут иметь вид:

$$A = \begin{bmatrix} -0,124 & 0,084 \\ 0,146 & -0,349 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -4,31 \end{bmatrix}; \quad C = [1 \quad 1].$$

Собственные числа матрицы A (корни характеристического полинома $\det(Is - A) = 0$): $s_1 = -0,394$, $s_2 = -0,079$ – вещественные, отрицательные. Следовательно, объект обладает свойством устойчивости положения равновесия.

Матрица управляемости имеет вид

$$Mu = [B:AB] = \begin{bmatrix} 0 & -0,362 \\ -4,31 & 1,504 \end{bmatrix}.$$

Ранг матрицы Mu равен $2 = n$, следовательно, объект, описываемый моделью (10), управляем в пространстве состояний.

Из этого следует возможность синтеза системы модального управления на базе регулятора состояния [6, 7], формирующего управляющее воздействие как линейную функцию переменных состояния:

$$u = -K\Delta \bar{x} = -k_1\Delta x_4 - k_2\Delta x_5. \quad (11)$$

Параметрический синтез безынерционного регулятора (11) осуществлен с использованием процедуры перехода от описания объекта (10) к представлению в канонической управляемой форме (КУФ):

$$\frac{d\Delta \hat{x}}{d\tau} = \hat{A}\Delta \hat{x} + \hat{B}u, \quad (12)$$

$$u = -\hat{K}\Delta \hat{x},$$

где $\hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_0 & a_1 \end{bmatrix}$ – сопровождающая матрица

характеристического полинома исходной матрицы A модели (10): $\varphi(s) = s^2 + a_1s + a_0$;

$a_0 = 0,031$; $a_1 = 0,473$; $\hat{B} = (0 \quad 1)^T$ – вектор коэффициентов управления.

Вектор-строка параметров \hat{K} в (12) определяется соотношением

$$\hat{k}_i = d_{i-1} - a_{i-1}, \quad i = \overline{1,2},$$

где d_{i-1} – коэффициенты желаемого характеристического полинома (полинома Ньютона)

$$D(s) = s^2 + d_1s + d_0 = s^2 + 2\omega_0s + \omega_0^2 = (s + \omega_0)^2.$$

Значения среднегеометрического корня ω_0 при времени регулирования $\tau_p \approx 20$ мин для выбранного типа и порядка эталонного характеристического полинома определено согласно методике [7]: $\omega_0 = 0,24$ мин. Коэффициенты регулятора в преобразованной системе (12) примут значения: $\hat{k}_1 = 0,027$; $\hat{k}_2 = 0,006$.

Переход к коэффициентам обратной связи исходной системы (10) осуществляется по уравнению

$$K = \hat{K}Pu, \quad (13)$$

где $Pu = \hat{M}u \cdot Mu^{-1}$ – матрица преобразования исходной системы (10) к КУФ (12); Mu , $\hat{M}u$ – матрицы управляемости объекта, заданного исходной моделью (10) и моделью КУФ (12), соответственно.

Параметры регулятора состояния исходного объекта, согласно (13), примут значения:

$$k_1 = -0,071; \quad k_2 = -0,002.$$

Таким образом, управляющее воздействие запишется следующим образом:

$$u = 0,071\Delta x_4 + 0,002\Delta x_5. \quad (14)$$

По структуре алгоритм (14) является пропорциональным регулятором, который, как известно, не обеспечивает надлежащего отслеживания уставок или возмущающих воздействий по нагрузке в системе. Поэтому желательно введение в алгоритм управления интегральной составляющей, снижающей ошибку регулирования в статике. При этом число переменных состояния, для которых вводится интегральная составляющая, не должно превышать числа управляющих воздействий. В нашем случае целесообразно ввести интегральную составляющую по температуре в реакторе Δx_4 . Управление в этом случае определяется соотношением

$$u = -(k_1\Delta x_4 + k_2\Delta x_5) - k_3 \int_0^{\tau} \Delta x_4 d\tau. \quad (15)$$

Для расчета настроек РС с интегральной составляющей сформируется

расширенная модель объекта. Исходная модель (10) дополняется уравнением для вспомогательной переменной z , подчиняющейся уравнению

$$\frac{dz}{d\tau} = \Delta x_4 \quad \text{или} \quad z = \int_0^{\infty} \Delta x_4 \cdot d\tau. \quad (16)$$

Далее проводились все этапы расчета настроек для расширенной системы уравнений математической модели. Эталонный характеристический полином (полином Ньютона) с желаемым спектром собственных чисел имеет вид

$$D(s) = s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0 = s^3 + 3\omega_0s^2 + 3\omega_0^2s + \omega_0^3.$$

При этом значение среднегеометрического корня при времени регулирования ~ 20 минут принималось $\omega_0 = 0,3$ мин⁻¹.

Параметры настроек регулятора имеют значения:

$$k_1 = -0,514; \quad k_2 = -0,099; \quad k_3 = -0,075.$$

Выражение (15) в явном виде запишется как

$$u = 0,514\Delta x_4 + 0,099\Delta x_5 + 0,075 \int_0^{\tau} \Delta x_4 d\tau. \quad (17)$$

Результаты исследования. В соответствии с сформулированными задачами САУ температурой (стабилизация, слежение) работоспособной будет система, обладающая свойством инвариантности к внешним низкочастотным возмущениям (объект существенно инерционен) и свойством ковариантности с задающим воздействием. Кроме того, САУ должна быть робастной, так как синтез альтернативных вариантов алгоритма управления осуществлялся с использованием декомпозированных (редуцированных) моделей объекта, в то время как реальный объект существенно нелинеен.

В связи с этим исследование работоспособности алгоритмов управления путем моделирования системы проводилось с использованием исходной нелинейной модели объекта (1)–(2) в условиях отсутствия измерений текущих значений концентраций.

На рис. 1 представлены переходные процессы управления (регулируемая переменная и управляющее воздействие) при действии ступенчатого внешнего возмущения по входной концентрации исходного реагента $A - C_{\text{Авх}}$.

Анализ представленных зависимостей показывает, что безынерционный регулятор состояния и синергетический алгоритм без интегральной составляющей характеризуются большим значением статической ошибки и не рекомендуются для решения задачи стабилизации. С точки зрения величины перерегулирования и времени регулирования предпочтительно использовать синергетический алгоритм с интегральной составляющей. Анализ результатов исследования свойства ковари-

антности с заданием (рис. 2) приводит к аналогичному выводу.

Анализ робастности системы проводился путем исследования влияния вариации параметра теплопередачи β на показатели качества процесса управления (рис. 3). Наилучшие результаты демонстрирует также синергетический алгоритм с интегральной составляющей, реализующий каскадно-связанное управление температурой.

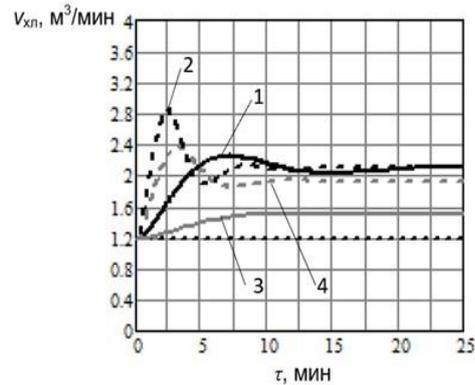
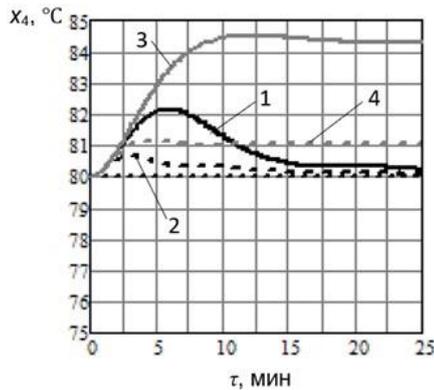


Рис. 1. Переходные процессы управления x_4 при внешнем воздействии $\Delta C_{\text{ДВХ}} = 0,1 C_{\text{ДВХ}}^0$: 1 – астатический РС; 2 – астатический синергетический регулятор; 3 – безынерционный РС; 4 – безынерционный синергетический регулятор

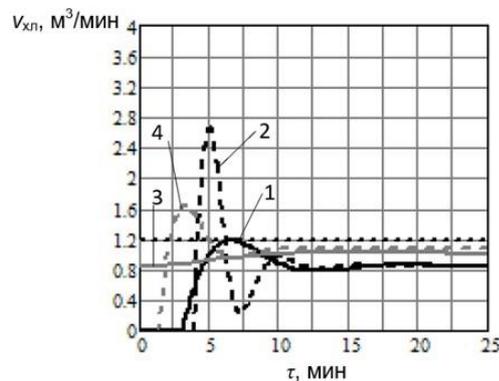
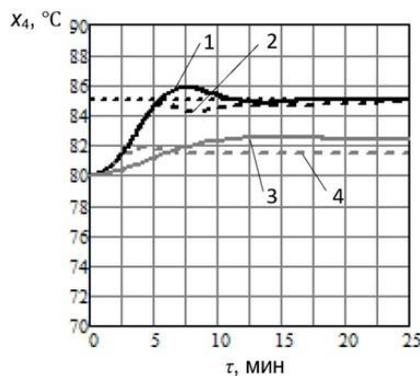


Рис. 2. Переходные процессы управления x_4 при изменении задания $\Delta x_4^{\text{зад}} = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$: 1 – астатический РС; 2 – астатический синергетический регулятор; 3 – безынерционный РС; 4 – безынерционный синергетический регулятор

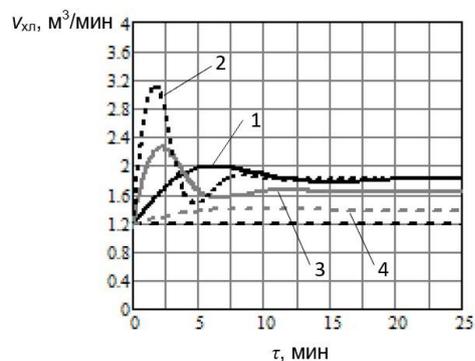
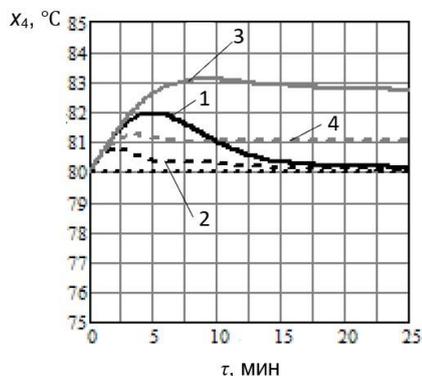


Рис. 3. Переходные процессы управления x_4 при параметрическом возмущении $\Delta\beta = -0,2\beta$: 1 – астатический РС; 2 – астатический синергетический регулятор; 3 – безынерционный РС; 4 – безынерционный синергетический регулятор

Необходимо отметить, что удовлетворительное качество переходных процессов управления характерно и для астатического РС, алгоритм реализации которого существенно проще.

Выводы. Путем компьютерного моделирования показано, что из четырех алгоритмов управления температурой в химическом реакторе, синтезированных с использованием редуцированных моделей объекта, наилучшие показатели качества переходных процессов управления демонстрирует нелинейный алгоритм с интегральной составляющей, синтезированный методом АКАР. Удовлетворительные результаты характерны и для астатического РС. Данные алгоритмы могут быть рекомендованы к реализации.

Список литературы

1. **Синергетика** и проблемы теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М.: Физматлит, 2004. – 504 с.

2. **Колесников А.А.** Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – 2-е изд. – М.: Либроком, 2012. – 240 с.

3. **Анализ** параметрической чувствительности и структурная оптимизация систем модального управления с регуляторами состояния / А.А. Анисимов, Д.Г. Котов, С.В. Тарарыкин, В.В. Тютиков // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 5. – С. 18–32.

4. **Тютиков В.В., Тарарыкин С.В.** Робастное модальное управление технологическими объектами. – Иваново, 2006. – 256 с.

5. **Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Островский Г.М.** Новые подходы к проектированию химико-технологических процессов, аппаратов и систем в условиях интервальной неопределенности. – М.: Изд. дом «Спектр», 2012. – 344 с.

6. **Синтез** систем управления методом модального управления / В.В. Григорьев, Н.В. Журавлева, Г.В. Лукьянова, К.А. Сергеев. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. – 108 с.

7. **Методы** классической и современной теории автоматического управления: в 3 т. Т. 2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления / под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 736 с.

8. **Гайдук А.Р.** Теория и методы аналитического синтеза САУ. – М.: Физматлит, 2012. – 360 с.

9. **Analytical** Synthesis of non-linear control algorithms of a chemical reactor thermal mode / A.N. Labutin, M. Vasko, I. Kuric, et al. //

Processes. – 2021. – No. 9. – P. 644. <https://doi.org/10.3390/pr9040644>

10. **Аналитический** синтез нелинейных алгоритмов управления тепловым режимом химического реактора / В.Ю. Невиницын, Ю.Н. Загаринская, Г.В. Волкова, А.Н. Лабутин // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2019. – № 50(76). – С. 115–120.

References

1. Kolesnikov, A.A. (red.) *Sinergetika i problemy teorii upravleniya* [Synergetics and problems of control theory]. Moscow: Fizmatlit, 2004. 504 p.

2. Kolesnikov, A.A. *Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnyimi sistemami: teoriya sistemnogo sinteza* [Synergetic methods for managing complex systems: theory of system synthesis]. Moscow: Librokom, 2012. 240 p.

3. Anisimov, A.A., Kotov, D.G., Tararykin, S.V., Tyutikov, V.V. *Analiz parametricheskoy chuvstvitel'nosti i strukturnaya optimizatsiya sistem modal'nogo upravleniya s regulyatorami sostoyaniya* [Parametric sensitivity analysis and structural optimization of modal control systems with state controllers]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2011, no. 5, pp. 18–32.

4. Tyutikov, V.V., Tararykin, S.V. *Robastnoe modal'noe upravlenie tekhnologicheskimi ob'ektami* [Robust modal control of technological objects]. Ivanovo, 2006. 256 p.

5. Dvoretzkiy, D.S., Dvoretzkiy, S.I., Ostrovskiy, G.M. *Novye podkhody k proektirovaniyu khimiko-tekhnologicheskikh protsessov, apparatov i sistem v usloviyakh interval'noy neopredelennosti* [New approaches to the design of chemical technological processes, devices and systems under conditions of interval uncertainty]. Moscow: Izdatel'skiy dom «Spektr», 2012. 344 p.

6. Grigor'ev, V.V., Zhuravleva, N.V., Luk'yanova, G.V., Sergeev, K.A. *Sintez sistem upravleniya metodom modal'nogo upravleniya* [Synthesis of control systems using the modal control method]. Saint-Petersburg: SPbGU ITMO, 2007. 108 p.

7. Egupov, N.D. (red.). *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya: v 3 t., t. 2: Sintez regulyatorov i teoriya optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classical and modern theory of automatic control: in 3 vols., vol. 2: Synthesis of controllers and theory of optimization of automatic control systems]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2000. 736 p.

8. Gaiduk, A.R. *Teoriya i metody analiticheskogo sinteza SAU* [Theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems]. Moscow: Fizmatlit, 2012. 360 p.

9. Labutin, A.N., Vasko, M., Kuric, I., Neviniцын, V.Y., Saga, M., Zagarinская, Y.N., Volkova, G.V. *Analytical Synthesis of non-linear control algorithms*

of a chemical reactor thermal mode [Analytical Synthesis of non-linear control algorithms of a chemical reactor thermal mode]. *Processes*, 2021, no. 9, p. 644. <https://doi.org/10.3390/pr9040644>

10. Nevinitsyn, V.Yu., Zagarinskaya, Yu.N., Volkova, G.V., Labutin, A.N. Analiticheskiy sintez

nelineynykh algoritmov upravleniya teplovym rezhimom khimicheskogo reaktora [Analytical synthesis of non-linear control algorithms of a chemical reactor thermal mode]. *Izvestiya SPbGTI(TU)*, 2019, no. 50(76), pp. 115–120.

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 – **11**.

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 – 10 (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 – 11, 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 3

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82616 от 18.01.2022 г.

Подписано в печать 14.06.2024. Выход в свет 30.06.2024. Формат 60x84 ¹/₈.
Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 10,81. 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