



Ивановский государственный энергетический университет

Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ)

Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Vestnik IGEU)

Журнал издается с 2001 года

ISSN 2072-2672

Индекс 18079

2024 / Вып. 2

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

А.А. Зидиханова, А.Б. Ларин. Ведение ВХР с применением реагентов ВТИАМИН на ТЭЦ с сезонным режимом работы.....**5**

В.А. Горбунов, Д.О. Фомичев, А.Р. Масев, Е.В. Крайнов. Оценка возможности использования пакета COMSOL для моделирования теплогидравлических процессов в реакторах ВВЭР.....**15**

А.Б. Бирюков, Ю.О. Турулина. Инженерная методика определения температурного состояния металла при его нагреве.....**24**

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

В.Д. Лебедев, Д.Г. Григорьев. Разработка и исследование подхода к обработке сигналов цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения.....**32**

О.С. Мельникова, А.М. Чикалева, С.В. Воробьев. Разработка и исследование имитационной модели мультикамерного разрядника для грозозащитного троса**49**

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

А.Е. Савенко, П.С. Савенко. Особенности работы кранового группового электропривода с частотным управлением на морском судне.....**59**

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

А.А. Анисимов, К.Е. Соколов, С.В. Тарарыкин. Синтез параметрически грубых систем управления с регуляторами и наблюдателями состояния на основе грамианных технологий.....**70**

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский, К.Н. Бубнов, С.И. Шувалов, М.А. Кузнецов. Матричное моделирование и диагностика состояния регенеративных подогревателей высокого давления.....**82**

М.Е. Соловьев, М.И. Маркин. Математическое моделирование пиролиза резиновых отходов в горизонтальном цилиндрическом реакторе.....**92**

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 2

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

A.A. Zidikhanova, A.B. Larin. Water-chemical regime with use of VTIAMIN reagents at TTP with seasonal mode of operation.....**5**

V.A. Gorbynov, D.O. Fomichev, A.R. Masev, E.V. Kraynov. Assessment of feasibility of using COMSOL software for modeling thermohydraulic processes in WWER reactors.....**15**

A.B. Birukov, J.O. Turulina. Engineering method to determine metal temperature state when it is heated.....**24**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

V.D. Lebedev, D.G. Grigorev. Development and research of an approach to signal processing of digital instrument current and voltage transformers.....**32**

O.S. Melnikova, A.M. Chikaleva, S.V. Vorobyov. Development and research of a simulation model of a multi-chamber arrester for lightning protection cable.....**49**

ELECTROMECHANICS

A.E. Savenko, P.S. Savenko. Operation of crane group electric drive with frequency control on a marine vessel.....**59**

AUTOMATION CONTROL SYSTEMS

A.A. Anisimov, K.E. Sokolov, S.V. Tararykin. Synthesis of parametrically rough control systems with regulators and state observers based on Gramian technologies.....**70**

**MATHEMATICAL METHODS
IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY**

**V.P. Zhukov, G.V. Ledukhovsky, K.N. Bubnov,
S.I. Shuvalov, M.A. Kuznetsov.** Matrix modeling
and condition diagnostics of high pressure
regenerative heaters.....**82**

M.E. Soloviev, M.I. Markin. Mathematical
modeling of pyrolysis of rubber waste in horizontal
cylindrical reactor.....**92**

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 621.187

Аида Альбертовна Зидиханова

ООО «ВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ», соискатель, инженер-технолог, Россия, Москва, e-mail: az@wteng.ru

Андрей Борисович Ларин

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

Ведение ВХР с применением реагентов ВТИАМИН на ТЭЦ с сезонным режимом работы

Авторское резюме

Состояние вопроса. В состав основного оборудования ТЭЦ входит паровой котел Е-120-7,0-500ГМ производства ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ» с одноступенчатой схемой испарения. Режим работы ТЭЦ имеет сезонные особенности: в период с февраля по конец августа оборудование останавливается в резерв. Дозирование АМИНАТ ПК-3 не обеспечивает необходимого уровня pH в паре и питательной воде, а также не обеспечивает защиту внутренних поверхностей оборудования в период сезонного останова, поэтому была выполнена замена реагента для ведения водно-химического режима и консервации с АМИНАТ ПК-3 на ВТИАМИН КР-33. Комплексный реагент ВТИАМИН КР-33 обеспечивает поддержание требуемых показателей качества теплоносителя по тракту и способствует формированию на внутренних поверхностях нагрева защитной барьерной пленки.

Материалы и методы. Для контроля ведения водно-химического режима модернизирована имеющаяся система автоматизированного химического контроля, установлены щиты автоматического химического контроля величины pH, электропроводности прямой и H-катионированной пробы, выполнена замена фильтрующего материала и обвязка механических фильтров, заменена первая ступень установки обратного осмоса, смонтирована вторая ступень установки обратного осмоса и установлены фильтры финишной доочистки H-OH.

Результаты. Показана возможность использования в качестве химического контроля водно-химического режима котлов с сезонным режимом работы измерений электропроводности охлажденных проб воды и пара. Установлено, что дозирование реагента ВТИАМИН КР-33 с периодической поддозировкой реагента ВТИАМИН Д-8 в котловую воду способствует предотвращению осаждения солей жесткости и других примесей, поступающих с возвратным конденсатом с производства. Анализ показателей водно-химического режима на ТЭЦ при работе с дозированием реагента ВТИАМИН КР-33 в две точки показал,

что величина pH питательной воды находится в пределах 8,8–9,0 и показатели водно-химического режима по содержанию железа, кремниевой кислоты и натрия также находятся в нормируемых пределах. Подобран состав реагентов, обеспечена гибкость ведения водно-химического режима. Дозировка аминосодержащего реагента ВТИАМИН нейтрализует негативное воздействие агрессивных газов (углекислоты и кислорода) за счет их связывания и образования защитной пленки магнетито-аминового типа на поверхностях нагрева.

Выводы. Внедрение предложенного водно-химического режима при выводе оборудования в сезонный резерв не требует проведения дополнительных мероприятий по консервации.

Ключевые слова: паровой котел, энерготехнологическое оборудование, аминосодержащий реагент, водно-химический режим

Aida Albertovna Zidikhanova

LLC "Water Technologies Engineering", Technical Engineer, Applicant, Russia, Moscow, e-mail: az@wteng.ru

Andrey Borisovich Larin

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

Water-chemical regime with use of VTIAMIN reagents at TTP with seasonal mode of operation

Abstract

Background. The main equipment of the thermal power plant (TPP) includes a E-120-7.0-500GM steam boiler produced by LLC "Belenergomash – BZEM" with a single-stage evaporation circuit. The operating mode of the thermal power plant has seasonal characteristics. During the period of February to the end of August the equipment is stopped as a reserve. Dosing of AMINAT PK-3 does not provide the required pH level in steam and feed water, so the reagent for water-chemical regime and preservation has been substituted with VTIAMIN KR-33. The complex reagent VTIAMIN KR-33 ensures both the maintenance of the required quality indicators of the coolant along the path and promotes the formation of a protective barrier film on the internal heating surfaces.

Materials and methods. To check water-chemical regime, the existing automatic chemical control system has been updated. Panels have been installed for automatic chemical control of pH value, electrical conductivity of direct and H-cationized samples. The filter material has been replaced and the mechanical filters have been connected. The first stage of the filter has been replaced, the second stage of the filter and final purification filters H-OH have been installed.

Results. The authors have demonstrated the possibility to use boilers with seasonal operating modes and measuring the electrical conductivity of cooled water and steam samples as a chemical control of water chemistry. It is found out that dosing the VTIAMIN KR-33 reagent with periodic dosing of the VTIAMIN D-8 reagent into the boiler water prevent the precipitation of hardness salts and other impurities coming with the return condensate. Analysis of the indicators of the water chemistry regime at the thermal power plant when dosing the VTIAMIN KR-33 reagent at two points has shown that the pH value of the feed water is in the range of 8,8–9,0 and the indicators of the water chemistry regime in terms of the content of iron, silicic acid and sodium are also within the norm limits. The composition of the reagents is selected. Flexibility of water chemistry management is ensured. It has been shown that the dosage of the amine-containing reagent VTIAMIN neutralizes the negative effects of aggressive gases (carbon dioxide and oxygen) due to their binding and the formation of a protective film of the magnetite-amine type on heating surfaces.

Conclusions. Introduction of the water chemical regime when the equipment is stopped as a reserve does not require additional preservation measures.

Key words: steam boiler, power technology equipment, amino-containing reagent, water-chemical regime

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.005-014

Введение. В современных условиях эксплуатации оборудования ТЭС и промышленных предприятий, работающих с длительными сезонными остановками, наиболее

предпочтительным является водно-химический режим (ВХР) на основе комплексных аминосодержащих реагентов. Применение аминосодержащих реагентов обеспечивает

защиту поверхностей нагрева энергетического оборудования, а также конденсаторов и паропроводов от коррозии как в процессе эксплуатации оборудования, так и в стояночных режимах [1–3].

Ниже рассмотрены результаты опыта работы по наладке и сопровождению ВХР с применением комплексных аминокислотных реагентов марки ВТИАМИН на энерготехнологическом котле высокого давления промышленного предприятия с сезонным циклом работы. Показана эффективность применяемых реагентов подобного типа при имеющихся нарушениях ВХР по содержанию кислорода ввиду индивидуальных особенностей тепловой схемы.

В состав основного оборудования ТЭЦ входит паровой котел Е-120-7,0-500ГМ производства ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ» с одноступенчатой схемой испарения. Регулирование температуры перегретого пара осуществляется впрыском питательной воды, отбираемой за водяным экономайзером. Технические характеристики котла представлены в табл. 1.

Пар из котла подается на паровую турбину Siemens SST-300 с последующим отпуском пара на производство. Особенностью тепловой схемы с противодавленческой турбиной является отсутствие в ней конденсатора, так как весь генерируемый

пар отпускается на производство, откуда возвращается в виде конденсата. Режим работы ТЭЦ имеет сезонные особенности: в период с февраля по конец августа оборудование останавливается в резерв.

Наладка ВХР на начальном этапе эксплуатации ТЭЦ. С момента ввода в эксплуатацию котел находился в работе в сезоне 2016–2017 гг., при этом не соблюдались нормы и правила ведения ВХР², отсутствовала коррекционная реагентная обработка, а также не проводилась предпусковая очистка и пассивация. В обессоленную воду, вопреки всем правилам, дозиrowался едкий натр для повышения величины рН, при этом отмечалась крайне низкая величина рН пара. Величина рН питательной воды была в нормируемых пределах, однако содержание натрия значительно превышало нормативы из-за дозирования едкого натра в обессоленную воду.

При строительстве ТЭЦ в 2016 г. проектом была предусмотрена дозировка реагентов для коррекционной обработки в питательную и котловую воды: в питательную – реагент АМИНАТ ПК-3, в котловую – фосфаты. После устранения имеющихся эксплуатационных недоработок были использованы проектные узлы для обеспечения дозирования реагента ВТИАМИН КР-33.

Таблица 1. Технические характеристики энерготехнологического котла Е-120-7,0-500ГМ

Наименование параметра	Величина
Номинальная паропроизводительность, т/ч	120
Рабочее давление пара, МПа (кгс/см ²)	7,0 (70)
Температура перегретого пара, °С	500
Температура питательной воды, °С	140
Температура газов на выходе из котла, °С	130
Коэффициент полезного действия, %, не менее	94,7

Методы исследования. Отличительная особенность выбранного для ведения ВХР реагента ВТИАМИН КР-33, в отличие от

реагента АМИНАТ ПК-3 и фосфатов, состоит в том, что комплексный реагент ВТИАМИН КР-33 обеспечивает как поддер-

² Приказ Минэнерго России от 04.10.2022 N 1070 «Об утверждении Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации и о внесении изменений в приказы Минэнерго России от 13 сентября 2018 г. № 757, от 12 июля 2018 г. № 548»; СТО 70238424.27.100.013-2009. Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС. Условие создания. Нормы и требования: Стандарт организации. – М.: НП «ИНВЭЛ», 2009.

жение требуемых показателей качества теплоносителя по тракту, так и формирование на внутренних поверхностях нагрева защитной барьерной пленки, препятствующей проникновению к поверхности металла любых коррозионно-агрессивных веществ, тем самым способствуя уменьшению вероятности развития коррозионных процессов. Помимо этого, дозирование АМИНАТ ПК-3 не обеспечивало необходимого уровня pH в паре и питательной воде, поэтому для ведения ВХР и консервации была выполнена замена реагента АМИНАТ ПК-3 на ВТИАМИН КР-33 на основании предыдущих исследований и опытно-промышленных испытаний [4–5].

Для контроля ведения ВХР в период наладочных работ также была модернизирована имеющаяся система автоматического химического контроля (АХК), установлены щиты автоматического химического контроля величины pH, электропроводности прямой и H-катионированной проб питательной воды и пара, а также кислорода в питательной воде и отдельный щит для контроля pH и электропроводности прямой пробы котловой воды.

При ознакомлении со схемой подготовки добавочной воды было предложено произвести реконструкцию водоподготовительной установки, так как существующая технология не обеспечивала надежной работы и надлежащего качества обессоленной воды для котлов с одной ступенью испарения. Была выполнена замена фильтрующего материала и обвязка механических фильтров, заменена первая ступень УОО,

смонтирована вторая ступень УОО и установлены фильтры финишной доочистки Н-ОН. В результате на выходе с ВПУ электропроводность обессоленной воды не превышала 0,2 мкСм/см.

На основании того что котел работал без поддержания водно-химического режима, было принято решение о проведении перед пуском отмывки и пассивации с применением комплексного реагента ВТИАМИН КР-31. Целью отмывки и пассивации являлась очистка поверхностей нагрева котла и паропроводов от отложений, накопившихся за период эксплуатации, а также создание защитной пленки на поверхностях нагрева котла. Отмывка и пассивация производились в соответствии с программой в период с 11.08.2017 по 14.08.2017 и были совмещены с продувкой паропроводов. По окончании отмывки был произведен «сухой останов». В дальнейшем на котле выполнялись наладка тепломеханических режимов работы, отладка режимов горения с подключением на различной нагрузке паровой турбины.

Результаты исследований первого этапа. Результаты по изменению величины удельной электропроводности (УЭП) по тракту при пуске котла после проведения отмывки и пассивации приведены на рис. 1 и 2.

Пик значений электропроводности конденсата 06.09.17 (рис. 1) вызван подмесом конденсата второго корпуса производства с высоким pH и большим содержанием органики. Данное явление привело к увеличению электропроводности и H-катионированной пробы по тракту (рис. 2).

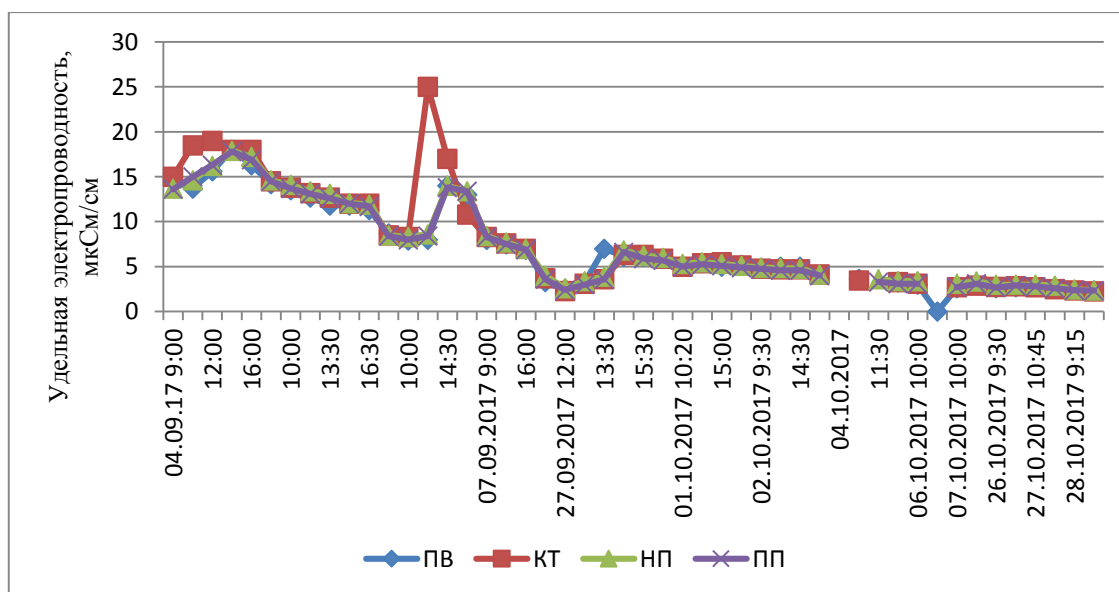


Рис. 1. Изменение удельной электропроводности по тракту блока в различные моменты предпусковых операций и эксплуатации: ПВ – питательная вода; КТ – конденсат; НП – насыщенный пар; ПП – перегретый пар

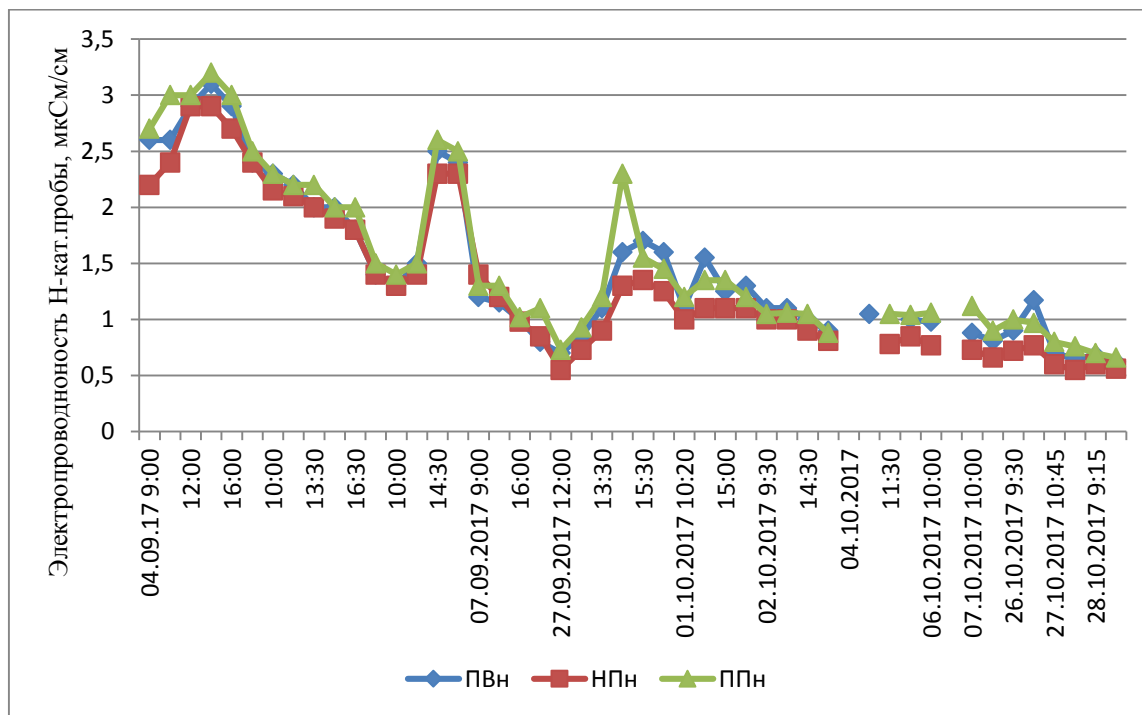


Рис. 2. Изменение электропроводности Н-катионированной пробы по тракту блока: ПВн – питательная вода; НПн – насыщенный пар; ППн – перегретый пар

В дальнейшем снижение электропроводности происходило крайне медленно. В итоге удалось добиться значений электропроводности Н-катионированной пробы перегретого пара на уровне 0,7–0,9 мкСм/см (рис. 1, 2).

Следует отметить, что предъявляемые зарубежными компаниями (к подобным котлам) жесткие требования по значению удельной электропроводности Н-катионированной пробы (до 0,5 мкСм/см) ориентируются на аммиачный водно-химический режим и не учитывают особенностей ведения ВХР с применением аминов.

Таким образом, период наладки ВХР на начальном этапе испытаний завершился успешно. Основными оперативно контролируемыми показателями можно принять автоматические измерения удельной электропроводности прямой и Н-катионированной проб.

Результаты исследований второго этапа. *Наладка ВХР парового кола E-120-7,0-500ГМ и паровой турбины SST-300 с применением комплексного реагента ВТИАМИН.* С 2018 г. водно-химический режим ТЭЦ на паровом котле E-120-7,0-500ГМ и паровой турбине SST-300 поддерживается дозированием реагентов ВТИАМИН КР-33 с периодической дозировкой реагента ВТИАМИН Д-8 в котловую воду для предот-

вращения осаждения солей жесткости и других примесей, поступающих с возвратным конденсатом с производства в периоды пуска оборудования после сезонного резерва.

При работе котла и паровой турбины с дозированием реагента ВТИАМИН КР-33 была реализована следующая схема дозирования: в питательную воду ВТИАМИН КР-33 дозировался с концентрацией 5 % и производительностью насоса-дозатора 0,8 л/ч; в котловую воду – с концентрацией 0,5 % и производительностью насоса-дозатора до 20 л/ч и добавлением едкого натра с концентрацией рабочего раствора 0,024 %.

Анализ показателей водно-химического режима на ТЭЦ при работе с дозированием реагента ВТИАМИН КР-33 в две точки показал, что величина рН питательной воды находилась в пределах 8,8–9,0, при этом величина рН котловой воды находилась в пределах от 9,0 до 9,5.

При этой схеме дозировки величина электропроводности Н-катионированной пробы перегретого пара перед турбиной находилась в пределах от 0,3 до 0,66 мкСм/см. Показатели водно-химического режима по содержанию железа, кремниевой кислоты и натрия находились в нормируемых пределах. Однако наблюдалось нарушение по содержанию кислорода в питательной воде, значение которого находилось в пределах

от 25 до 200 мкг/дм³ при работе ТЭЦ с большим процентом добавочной воды (обессоленная вода) (табл. 2).

Нарушения по содержанию кислорода вызваны тем, что установленный на ТЭЦ деаэратор не справляется с деаэрацией потока добавочной воды, поступающей из бака запаса обессоленной воды с содержанием кислорода до 8,0 мг/дм³. При отсутствии конденсатора, традиционно выполняющего первую основную стадию деаэрации, вся нагрузка в рассматриваемой схеме ложится на деаэратор, который по своим характеристикам не может обеспечить полноту удаления растворенных газов (кислорода и уголекислоты) из обессоленной воды.

По результатам аналитического измерения и на основании расчетных данных содержание свободной и связанной уголекислоты в обессоленной воде достигает 8 мг/дм³. При этом в общем потоке питательной воды содержание кислорода меняется от 20 до 200 мкг/дм³, а содержание уголекислоты достигает величины 1800 мкг/дм³. В потоке возвращаемого конденсата с производства кислород не превышает 20 мкг/дм³, а значительная часть кислорода поступает с добавочной водой. Деаэрация общего потока конденсата и добавочной воды осуществляется в деаэраторе, где содержание кислорода снижается до 25–200 мкг/дм³ (в зависимости от расхода обессоленной воды, подаваемой на восполнение потерь).

При увеличении количества добавочной обессоленной воды соответственно увеличивается дозировка реагента ВТИАМИН КР-33 в питательную воду, что ведет к увеличению УЭП Н-катионированной пробы пара, так как питательная вода подается на регулирование перегрева пара, поступающего на паровую турбину.

При реализованной схеме дозирования с 2017 г. были достигнуты положительные результаты:

- содержание железа не превышает 11 мкг/дм³ в питательной воде и не более 60 мкг/дм³ в котловой воде;

- обеспечивается электропроводность Н-катионированной пробы от 0,5 до 1,0 мкСм/см (разбег значений обусловлен долей добавочной (обессоленной) воды, содержащей растворенную уголекислоту и кислород в общем потоке питательной воды).

В следующем сезоне после проведения предварительной промывки в сентябре

2020 г. были начаты пусковые мероприятия на ТЭЦ в целях обеспечения производства паром. В процессе выполнения пусковых мероприятий практически с первых часов подключения теплообменного оборудования ухудшалось качество возвращаемого с производства конденсата по содержанию жесткости и величине электропроводности. Качество конденсата по содержанию солей жесткости стабильно держалось на уровне от 8 до 18 мкг-экв/дм³, что приводило к увеличению солей жесткости в питательной воде до 12 мкг-экв/дм³ при нормируемом значении не более 0,2 мкг-экв/дм³. Помимо стабильно высоких показателей жесткости, наблюдались и значительные «забросы» солей жесткости (до 100–120 мкг-экв/дм³). Кроме нарушений по содержанию солей жесткости, качество конденсата превышало и нормируемую величину электропроводности. Так, величина электропроводности при норме не более 1,0 мкСм/см достигала величин 1,5–2,0 мкСм/см.

Необходимо отметить, что на основании конструктивного исполнения котла с одной ступенью испарения, что было обусловлено изначально жесткими требованиями по качеству пара, подаваемого на паровую турбину SST–300, резкое ухудшение качества возвращаемого конденсата приводило к росту электропроводности перегретого пара из-за наличия в конденсате и, как следствие, в питательной воде значительных количеств солей жесткости и других агрессивных примесей, поступающих с конденсатом.

Так, требование к качеству питательной воды, поступающей в паропровод для регулирования температуры перегрева, по содержанию солей жесткости не должно превышать величины 0,2 мкг-экв/дм³. Однако достаточно длительный период качество питательной воды по содержанию жесткости было значительно хуже установленной нормы и достигало величины 6 мкг-экв/дм³. Подобные нарушения недопустимы, так как это приводит к солевого заносу проточной части паровой турбины и экранных поверхностей нагрева котла.

В связи с этим для предотвращения возможного осаждения солей жесткости на поверхностях нагрева котла выполнялись учащенные периодические продувки через нижние точки котла, а также была увеличена непрерывная продувка из котла. Для поддержания солей жесткости в растворенном виде была увеличена дозировка реагентов ВТИАМИН КР-33 и ВТИАМИН Д-8 в питательную и котловую воды.

Таблица 2. Данные химического контроля при величине подпитки обессоленной водой 12 т/ч

Дата отбора	Добавочная вода			Питательная вода за деаэратором					Котловая вода			Перегретый пар			
	æ, мкСм/см	Содержание O ₂ , мкг/дм ³	Табличное содержание* CO ₂ , мкг/дм ³	pH	æ, мкСм/см	æн, мкСм/см	Содержание O ₂ , мкг/дм ³	Расчетное содержание CO ₂ , мкг/дм ³	Fe, мкг/дм ³	pH	æ, мкСм/см	Fe, мкг/дм ³	pH	æ, мкСм/см	Расчетное содержание CO ₂ , мкг/дм ³
Подпитка обессоленной водой в количестве 12 т/ч, возвратный конденсат с производства 20 т/ч, общий поток питательной воды 32 т/ч															
04.02.20 8:00	0,07	9000	1970*	9	4,2	1,01	>40		9	9,17	5,84	8	8,2	3,3	1,32
04.02.20 11:00				9,5	4,7	1,07	>40	отс**		9,25	6		8,14	3,2	1,47
04.02.20 14:00				8,5	4,9	1,21	>40	1470	10	9,35	6,42	11	8,25	3,3	1,65
04.02.20 20:00				8,93		1,26	>40		10	9,38	8,2	8	8,4		1,78
04.02.20 23:00				8,8		1,42	>40		11				8,08		1,97
05.02.20 2:00				8,9		1,51	>40		9	9,49	8,5	12	8,18		2,09
05.02.20 8:00	0,08	9000	1970*	9,02	4,9	1,51	>40	758,5	10	9,53	8,5	8	8,32	4,9	2,08
05.02.20 10:20				10	7,9	1,6	>40			9,8	12		8,7	3,5	
07.02.20	0,08	9000	1970*	9,2	2,4		>40		-	9,8	23	-	8,8	2,6	307

Дозировка реагентов ВТИАМИН предотвращала осаждение поступающих примесей на поверхностях нагрева за счет образования растворенных в воде комплексов с нейтрализующими аминами, входящими в состав реагента. Взаимодействие нейтрализующих аминов с растворенными в конденсате примесями приводит к увеличению электропроводности воды, но не оказывает коррозионного воздействия на поверхности нагрева.

В процессе постепенной отмывки оборудования от остатков промывочных реагентов и за счет дозировки реагентов ВТИАМИН происходит стабилизация показателей водно-химического режима по качеству конденсата, что позволяет удовлетворять нормы ВХР по качеству питательной воды и пара, поступающего на паровую турбину.

Оценка эффективности ВХР с применением реагентов ВТИАМИН при визуальном осмотре внутренних поверхностей оборудования. В рамках технического сопровождения ведения ВХР с реагентами ВТИАМИН для оценки его эффективности специалистами ООО «ВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» и персоналом ТЭЦ в 2022 г. перед сезонным остановом был произведен внешний осмотр внутренней поверхности барабана котла Е-120-7,0-500ГМ и анализ защитных свойств оксидной пленки, выполненный на основании РД 34.37.409-96³. По результатам осмотра комиссия выявила следующее:

1. На внутренней поверхности барабана имеется тонкий вишневый налет (пудровой структуры) в незначительном количестве, равномерно распределенный по всей поверхности водяного объема барабана. Под тонким вишневым налетом создана

магнетито-аминовая защитная пленка, цвет пленки серо-голубой, коррозионных повреждений не наблюдается (рис. 3,а,б, где в барабане котла четко виден раздел границ водяного и парового объема).

2. При испытании оксидной пленки на коррозионную устойчивость капельным методом⁴ окраска капли не изменилась при времени выдержки более 10 мин, что характеризуется по шкале устойчивости как высшая степень устойчивости.

Выводы. В ходе наладки и технического сопровождения ВХР с применением реагентов ВТИАМИН на энерготехнологическом котле промышленной ТЭЦ получены следующие результаты:

1. Подобран состав реагентов марки ВТИАМИН с учетом качества питательной воды котла Е-120-7,0-500ГМ и его технологических особенностей.

2. Обеспечена гибкость ведения ВХР применительно к индивидуальным условиям со стабилизацией величины электропроводности пара на уровне не более 0,6 мкСм/см.

3. Установлено, что дозировка аминоксодержащего реагента ВТИАМИН нейтрализует негативное воздействие агрессивных газов (углекислоты и кислорода) за счет их связывания и образования защитной пленки магнетито-аминового типа на поверхностях нагрева.

4. Ведение водно-химического режима в процессе эксплуатации соответствует нормам⁵, а при выводе оборудования в сезонный резерв не требует проведения дополнительных мероприятий по консервации оборудования с сохранением соответствующих защитных свойств.

³ РД 34.37.409-96 Приложение №3 «Методика проверки защитных свойств оксидных пленок».

⁴ Там же.

⁵ СТО 00129840.34.37.010-2017 «Проведение очистки, консервации и ведение ВХР на основе аминоксодержащего реагента марки «ВТИАМИН КР-33».



а)



б)

Рис. 3. Внешний вид барабана котла

Список литературы

1. Гусева О.В., Бутакова М.В. Результаты внедрения комбинированного водно-химического режима паровых котлов с использованием реагента АМИНАТ ТМ ПК-2 // Новое в Российской электроэнергетике. – 2020. – № 4. – С. 12–20.

2. Петрова Т.И., Дяченко Ф.В., Орлов К.А. Отечественные и международные документы по

использованию реагентов, содержащих пленкообразующие амины, для организации водно-химического режима на ТЭС // Теплоэнергетика. – 2018. – № 4. – С. 60–64.

3. Комплексные реагенты на основе аминов / С.Ю. Суслов, А.В. Кирилина, И.А. Сергеев и др. // Теплоэнергетика. – 2017. – № 3. – С. 92–96.

4. Модернизация водно-химического режима паровых барабанных котлов на основе реагента

ВТИАМИН / А.В. Кирилина, С.Ю. Суслов, Е.Ф. Нартя и др. // Электрические станции. – 2023. – № 3. – С. 9–17.

5. **Некоторые** особенности свойств комплексных реагентов на основе аминов и водно-химический режим / С.Ю. Суслов, А.В. Кирилина, И.А. Сергеев и др. // Энергетик. – 2013. – № 2. – С. 28–35.

References

1. Guseva, O.V., Butakova, M.V. Rezul'taty vnedreniya kombinirovannogo vodno-khimicheskogo rezhima parovykh kotlov s ispol'zovaniem reagenta AMINAT TM PK-2 [Results of the implementation of a combined water-chemical regime of steam boilers using the reagent AMINAT TM PK-2]. *Novoe v Rossiyskoy elektroenergetike*, 2020, no. 4, pp. 12–20.

2. Petrova, T.I., Dyachenko, F.V., Orlov, K.A. Otechestvennye i mezhdunarodnye dokumenty po ispol'zovaniyu reagentov, soderzhashchikh plenkoobrazuyushchie aminy, dlya organizatsii vodno-khimicheskogo rezhima na TES [Domestic and in-

ternational documents on the use of reagents containing film-forming amines for organizing the water chemical regime at thermal power plants]. *Teploenergetika*, 2018, no. 4, pp. 60–64.

3. Suslov, S.Yu., Kirilina, A.V., Sergeev, I.A., Zezyulya, T.V., Sokolova, E.A., Eremina, E.V., Timofeev, N.V. Kompleksnye reagenty na osnove aminov [Complex reagents based on amines]. *Teploenergetika*, 2017, no. 3, pp. 92–96.

4. Kirilina, A.V., Suslov, S.Yu., Nartya, E.F., Kozlovsky, V.V., Zidikhanova, A.A., Larin, A.B. Modernizatsiya vodno-khimicheskogo rezhima parovykh barabannykh kotlov na osnove reagenta VTIAMIN [Modernization of the water-chemical regime of steam drum boilers based on the reagent VTIAMIN]. *Energetik*, 2023, no. 3, pp. 9–17.

5. Suslov, S.Yu., Kirilina, A.V., Sergeev, I.A., Sokolova, E.A., Suslov, I.S., Suslov, P.S. Nekotorye osobennosti svoystv kompleksnykh reagentov na osnove aminov i vodno-khimicheskiy rezhim [Some features of the properties of complex reagents based on amines and the water-chemical regime]. *Energetik*, 2013, no. 2, pp. 28–35.

УДК 621.039.517.5

Владимир Александрович Горбунов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: gorbynov.w@mail.ru

Дмитрий Олегович Фомичев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: fomichev.dmitry37@ya.ru

Александр Романович Масев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: smasev@bk.ru

Егор Владимирович Крайнов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: egor.krainov37@mail.ru

Оценка возможности использования пакета COMSOL для моделирования теплогидравлических процессов в реакторах ВВЭР

Авторское резюме

Состояние вопроса. Программные пакеты теплофизического моделирования широко используются для моделирования различных теплогидравлических процессов, включая моделирование твэлов ядерных реакторов. Верификация таких расчетов возможна только путем сравнения результатов, полученных в разных пакетах (кросс-верификация), ввиду крайней сложности или невозможности проведения аналитических расчетов или экспериментов. Представляется актуальным проведение кросс-верификации расчетов твэлов реактора ВВЭР, проводимых в широко используемом программном комплексе COMSOL Multiphysics, с помощью другого популярного пакета ANSYS.

Материалы и методы. Модели твэлов для анализа теплогидравлических процессов разработаны с использованием пакетов теплофизического моделирования ANSYS Fluent и COMSOL Multiphysics для кросс-верификации результатов расчетов в последнем. Моделирование температурных полей выполнено на основе уравнения теплопроводности с внутренним источником тепловыделений. Рассматривается несколько постановок задач: с учетом и без учета оболочки твэла и центрального отверстия в стержне топлива.

Результаты. Построены модели твэлов реактора ВВЭР-1000 в трех постановках задач с различным конструктивным исполнением в пакетах ANSYS Fluent и COMSOL Multiphysics. Методом конечных элементов определены температурные поля твэлов. Приведены результаты расчетов максимальной температуры топливного сердечника и произведено их сравнение для двух программных пакетов. Установлено, что максимальное относительное отклонение найденных температур составило 0,97 %.

Выводы. Сопоставление результатов расчета температур, полученных с помощью моделей, разработанных в двух программных пакетах, показывает, что относительное отклонение величин соответствует погрешности измерительных приборов. Это подтверждает, что программный пакет COMSOL Multiphysics можно успешно применять для моделирования процессов в реакторах ВВЭР наряду с ANSYS Fluent.

Ключевые слова: твэл, температурное поле твэла, кросс-верификация, численное моделирование, программные пакеты теплофизического моделирования, метод конечных элементов

Vladimir Alexandrovich Gorbunov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: gorbunov.w@mail.ru

Dmitry Olegovich Fomichev

Ivanovo State Power Engineering University, Post Graduate Student of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: fomichev.dmitry37@ya.ru

Aleksander Romanovich Masev

Ivanovo State Power Engineering University, Student of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo,
e-mail: smasev@bk.ru

Egor Vladimirovich Kraynov

Ivanovo State Power Engineering University, Student of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo,
e-mail: egor.krainov37@mail.ru

Assessment of feasibility of using COMSOL software for modeling thermalhydraulic processes in WWER reactors

Abstract

Background. Thermophysical modeling software packages are widely used for modeling various thermohydraulic processes including modeling nuclear reactor fuel element. Verification of such calculations is possible only if we compare the results obtained in different packages (cross-verification) due to the extreme complexity or impossibility to carry out analytical calculations or experiments. It seems relevant to carry out cross-verification of calculations of WWER reactor fuel elements in COMSOL Multiphysics software package using another popular ANSYS software package.

Materials and methods. Models of fuel elements for the analysis of thermohydraulic processes are developed using thermophysical modeling packages ANSYS Fluent and COMSOL Multiphysics for cross-verification of calculation results in the latter. Modeling of temperature fields is carried out based on the heat conduction equation with an internal heat source. The authors have considered several formulations of problems: with fuel element cladding and without it and the central hole in the fuel.

Results. Models of fuel elements of the WWER-1000 reactor have been designed for three formulations of problems with different designs in ANSYS Fluent and COMSOL Multiphysics software packages. Temperature fields have been determined using the finite element method. The results of the calculations of the fuel core maximum temperature are presented and compared for two software packages. The maximum relative deviation of the temperatures obtained is 0,97 %.

Conclusions. A comparison of the temperature calculations results obtained using models developed in two packages shows that the relative deviation of the values corresponds to the error of the measuring instruments. It confirms that COMSOL Multiphysics can be successfully used to simulate processes in WWER reactors along with ANSYS Fluent.

Key words: fuel element, fuel element temperature field, cross-verification, numerical simulation, thermophysical modeling software packages, finite element method

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.015-023

Введение. Для удовлетворения растущего спроса на электроэнергию необходимо постоянно вводить в эксплуатацию новые генерирующие мощности, а также своевременно замещать старые. Кроме того, по всему миру имеется тренд на отказ от использования сжигаемого органического топлива для производства электроэнергии. Одной из главных альтернатив является атомная энергетика. Многие развивающиеся страны, включая Китай, Индию и Россию, в своей энергетической политике делают ставку именно на АЭС и строят большое количество новых энергоблоков [1]. В то время как развитие реакторов малой мощности и новых поколений реакторов находится в зачаточном состоянии и пока не оправдывает себя [2], основным путем развития атомной энергетики остается повышение единичной мощности и оптимизация эффективности используемых элементов. Представляется актуальным проведение

моделирования процессов, протекающих в оборудовании, в целях использования результатов в решении задач повышения конкурентоспособности АЭС.

Тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) в активной зоне реактора являются одними из наиболее ответственных частей ядерной энергетической установки (ЯЭУ). От их правильного расчета и моделирования процессов в активной зоне зависит безопасность и надежность всей АЭС, что предполагает изучение различных характеристик, таких как температурные поля и распределение энерговыделения в активной зоне. Ввиду комплексности физики процессов, протекающих в активной зоне, точный аналитический расчет ТВЭЛов ограничен двумерной постановкой задачи с постоянными теплофизическими свойствами [3]. Для учета более сложной физики процессов требуется использование программных

пакетов теплофизического моделирования (Flow Vision, Elcut, COMSOL Multiphysics, ANSYS Fluent и др.).

В [4, 5, 6] проведено моделирование твэла для анализа его температурного поля при различных постановках задачи с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics. Данный пакет отсутствует в базе данных лицензированных программных средств, используемых корпорацией Росатом. Как отмечалось выше, для двумерной постановки задачи с постоянными теплофизическими свойствами результат можно верифицировать аналитическим решением. При трехмерной постановке либо при учете переменных теплофизических свойств возможна лишь кросс-верификация с использованием других программных пакетов, так как экспериментальные работы с материалами ядерной энергетики сопряжены с большими трудностями либо невозможны вовсе.

Целью настоящего исследования является подтверждение возможности использования пакета COMSOL Multiphysics для моделирования теплогидравлических процессов в реакторах ВВЭР, в частности для моделирования температурных полей твэлов. Для этой цели был выбран пакет ANSYS Fluent, который официально может использоваться для подобных расчетов и применяется, в том числе, корпорацией Росатом.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1) построение осесимметричной модели твэлов с использованием программных комплексов с соблюдением следующих условий:

- в двумерной постановке – без учета внутреннего отверстия и оболочки твэла;
- в трехмерной постановке – с отверстием внутри твэла без учета оболочки;
- в двумерной постановке – с учетом оболочки без отверстия;

2) сравнение параметров, полученных при моделировании твэлов в разных пакетах.

Методы исследования. В качестве основного метода исследования используется моделирование твэлов в программных комплексах COMSOL Multiphysics [7] и ANSYS Fluent [8] для кросс-верификации результатов путем их сравнения и вычисления относительной погрешности. Оба комплекса для расчетов используют метод конечных элементов.

Тепловыделяющий элемент является главным конструктивным элементом активной зоны гетерогенного ядерного реактора, который содержит ядерное топливо и в котором происходит основное энерговыделение. Твэлы объединяются в комплексы тепловыделяющих сборок (ТВС), в которых осуществляется их дистанционирование и формируется поток теплоносителя вблизи элементов, обеспечивая необходимый теплоотвод [9]. Расчеты проводились по характеристикам, соответствующим твэлам, входящим в ТВС модификации ТВСА-12 для ВВЭР-1000: диаметр топливной таблетки $d = 7,8$ мм, высота топливного столба $h = 3530$ мм. Кроме того, расчеты проводились для 10 вариантов стандартного процента обогащения топлива (1,6 %, 2 %, 2,4 %, 3 %, 3,6 %, 4 %, 4,4 %, 4,95 %, 5 % U-235) и разного времени топливного цикла. Масса топлива, не использованная в твэле, принималась 0,6 %. На основании этих характеристик вычислялись вспомогательные данные, необходимые для проведения моделирования. Полный перечень исходных данных для моделирования приведен в табл. 1.

В однородном реакторе энерговыделение по объему пропорционально плотности потока нейтронов и для цилиндрической активной зоны распределяется по следующему закону [10]:

$$Q(r, z) = Q_0 J_0 \left(\frac{2,405r}{R_3} \right) \cos \frac{\pi z}{H_3}, \quad (1)$$

где Q_0 – максимальное значение энерговыделения в центре реактора, МВт; J_0 – функция Бесселя нулевого порядка; R_3 – эффективный радиус, м; H_3 – эффективная высота, м; r, z – координаты точки расчета по радиусу и высоте соответственно, м.

В радиальном направлении энерговыделение изменяется по функции Бесселя нулевого порядка, а в осевом – по косинусоидальному закону [10] (рис. 1).

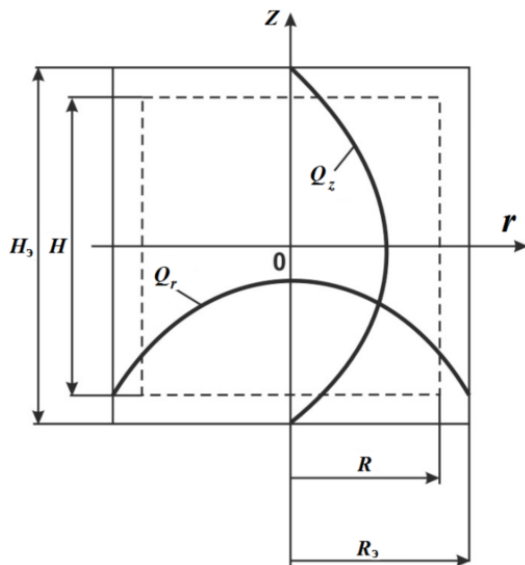
Двумерная постановка задачи без учета отверстия и оболочки твэла. Формулировка задачи основывается на уравнении теплопроводности [11]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] = q(x, y), \quad (2)$$

где T – температура, К; $\lambda(T)$ – теплопроводность как функция температуры, представленная линейным сплайном, Вт/(м·К); $q(x, y)$ – удельная мощность тепловыделения, Вт/м.

Таблица 1. Исходные данные для построения моделей твэлов

Характеристика	Значения при степени обогащения топлива, %								
	1,6	2	2,4	3	3,6	4	4,4	4,95	5
Масса топлива в твэле m , г	29,132	36,416	43,699	54,623	65,548	72,831	80,114	90,129	91,039
Энергия U-235, заложенная в твэле, ГДж	2380,12	2975,15	3570,18	4463,73	5355,28	5950,31	6545,34	7363,50	7437,88
Энергия U-235 в твэле после его использования, ГДж	892,546	892,546	892,546	892,546	892,546	892,546	892,546	892,546	892,5
Энергия U-235, использованная в твэле в период эксплуатации, ГДж	1488	2083	2678	3570	4463	5058	5653	6471	6545
Время топливного цикла, год	2	2,5	3	3,5	3,5	4	4	4,5	4,5
Мощность твэла, кВт	23,585	26,415	28,302	32,346	40,432	40,095	44,812	45,598	46,123
Удельная мощность, выделяемая 1 м ³ топлива, МВт/м ³	139,897	156,685	167,877	191,859	239,824	237,825	265,805	270,468	273,577

Рис. 1. Распределение энерговыделения по радиусу Q_r и высоте Q_z в однородной цилиндрической активной зоне

Допущения, принятые в данной постановке задачи:

- 1) стержень из двуокиси урана не имеет оболочки из сплава циркония;
- 2) расчет проводится для твэла, находящегося в работе в самых жестких условиях в центре реактора;
- 3) при нагреве твэла при омывании его поверхности не учитывается влияние режима потока жидкости.

Рассматривается сплошной твэл в виде сердечника из диоксида урана в виде стержня без полости (компенсатора объема) (рис. 2).

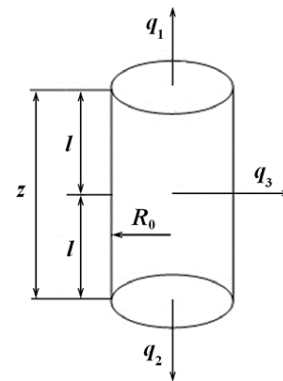


Рис. 2. Геометрические параметры стержня и граничные условия, определяющие решение

Начальная температура стержня составляет

$$T(r, z, 0) = 592 \text{ К}, \quad (3)$$

где $T(r, z, 0)$ – температура точек стержня с координатами (r, z) в момент времени $\tau = 0$; $r \in [0, R_0]$, $z \in [-l, l]$.

На торцевых поверхностях задаются граничные условия второго рода (рис. 2):

$$q_1(r, l, \tau) = 0, \quad r \in [0, R_0]; \quad (4)$$

$$q_2(r, -l, \tau) = 0, \quad r \in [0, R_0], \quad (5)$$

где $q_1(r, l, \tau)$ – поток (тепловыделение) на верхнем торце стержня в точке с координатой r в момент времени τ , Вт/м; $q_2(r, -l, \tau)$ – поток (тепловыделение) на нижнем торце стержня в точке с координатой r в момент времени τ , Вт/м.

На боковой поверхности стержня задаются граничные условия третьего рода (рис. 2):

$$q_3(R_0, z, \tau) = \alpha(T(R_0, z, \tau) - T_{oc}), \quad z \in [-l, l], \quad (6)$$

где $q_3(R_0, z, \tau)$ – линейная плотность теплового потока на боковой поверхности стержня, Вт/м; $T(R_0, z, \tau)$ – температура точек боковой поверхности стержня в момент времени τ , К; T_{oc} – температура окружающей среды, К ($T_{oc} = 592$ К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Для учета изменения теплофизических свойств при изменении температуры теплопроводность $\lambda(T)$ материала стержня (UO_2) задается интерполяционной функцией, построенной по заданным массивам значений [12].

Трехмерная постановка задачи с отверстием внутри твэла, без учета оболочки, с учетом радиационной составляющей теплообмена внутри таблетки. Одним из способов снижения максимальной температуры топлива является применение в конструкции твэла осевого отверстия, заполненного гелием. Кроме того, оно служит для компенсации колебания объема топливных таблеток при изменении мощности реактора и приема газообразных продуктов деления [13].

Для учета влияния отверстия изменим рассматриваемую модель, добавив в нее центральное отверстие диаметром 2,3 мм (рис. 3). Отверстие заполнено гелием при давлении 20 кгс/см². При этом будем учитывать кондуктивный и радиационный теплообмен внутри отверстия. Действие лучистого теплообмена нельзя полностью учесть в двумерной постановке задачи, так как каждая точка будет излучать энергию не только в направлении оси [11]. Поэтому в данной постановке задачи будем рассматривать трехмерную модель.

При учете радиационного теплообмена принимались следующие допущения:

1) окружающая среда имеет постоянную среднеинтегральную температуру $T_{oc} = 592$ К;

2) окружающая среда имеет свойства черного тела, так как рассматриваемая среда абсолютно замкнута.

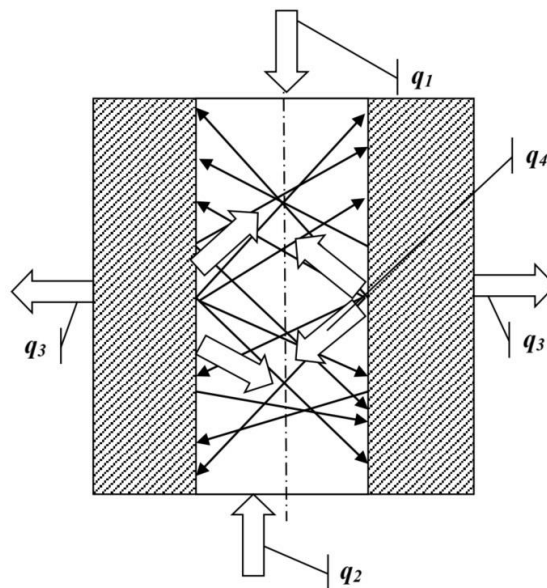


Рис. 3. Геометрические параметры стержня с отверстием и граничные условия, определяющие решение

Уравнение для теплового потока с учетом радиационной составляющей принимает вид

$$q_4(r_1, z, \tau) = \lambda_r(T) \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + \varepsilon \sigma (T_{\text{вн.пов}}^4 - T^4), \quad (7)$$

$$z \in [-l, l],$$

где $T_{\text{вн.пов}}$ и T – температура на поверхности центрального канала и температура материала (от более нагретых к менее нагретым точкам) стержня соответственно, К; r_1 – радиус центрального отверстия, м; $\lambda_r(T)$ – коэффициент теплопроводности гелия, Вт/(м·К); ε – коэффициент теплового излучения тела (степень черноты); σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴).

В задаче учитывается зависимость изменения теплофизических свойств UO_2 и гелия от температуры построением интерполяционных функций для теплопроводности по данным справочников [12, 14].

Остальные допущения и граничные условия аналогичны предыдущей постановке задачи.

Двумерная постановка задачи с учетом оболочки без отверстия. Твэлы реакторов типа ВВЭР, кроме топливного сердечника, также имеют оболочку, выполненную в виде трубки из сплава циркония с 1 %-ным содержанием ниобия (сплав Э-110) [13].

Для учета влияния оболочки на результат добавим ее в геометрию рассматриваемой модели сплошного твэла (рис. 4). Наружный диаметр топливного элемента принимался равным 9,1 мм, внутренний – 7,72 мм. При этом зазор между топливным сердечником и оболочкой величиной 0,1 мм будет заполнен гелием с давлением 20 кгс/см². Диаметр таблеток и высота топливного столба аналогичны значениям в предыдущих задачах.

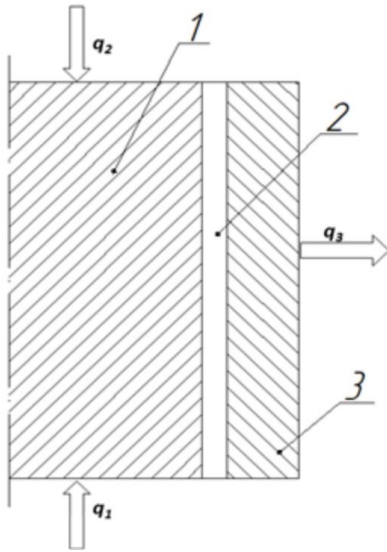


Рис. 4. Геометрические параметры стержня с оболочкой и граничные условия: 1 – топливо (диоксид урана); 2 – гелий (He); 3 – оболочка твэла (сплав Э-110)

Граничное условие второго рода кондуктивного теплообмена на внешней поверхности топлива (UO_2) имеет вид

$$q_3(R_0, z, \tau) = \lambda_r(T) \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad z \in [-l, l], \quad (8)$$

где $q_3(R_0, z, \tau)$ – тепловой поток с внешней поверхности топлива (UO_2), Вт/м; $\lambda_r(T)$ – коэффициент теплопроводности гелия, Вт/(м·К); $T = T_0(R_0, z, \tau)$ – температура на внешней границе топлива, К.

Граничное условие второго рода кондуктивного теплообмена на внутренней поверхности оболочки твэла имеет вид

$$q_3(R_{01}, z, \tau) = \lambda_{об}(T) \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad z \in [-l, l], \quad (9)$$

где $q_3(R_{01}, z, \tau)$ – тепловой поток с внутренней поверхности твэла, Вт/м; $\lambda_{об}(T)$ – коэффициент теплопроводности оболочки,

Вт/(м·К); R_{01} – радиус внутренней поверхности оболочки.

Как и в предыдущей задаче, будем учитывать зависимость изменения теплофизических свойств UO_2 и гелия от температуры построением интерполяционных функций для теплопроводности. Кроме того, будем учитывать изменение теплопроводности материала оболочки – сплава Э-110 [15].

Результаты исследования. Были построены модели твэлов, соответствующие описанным постановкам задачи, в пакетах COMSOL Multiphysics и ANSYS Fluent. На основании полученных моделей производилось исследование и расчет температурных полей.

В качестве оценочного параметра для сравнения моделей принималась максимальная температура топлива T_{\max} , так как именно она является одним из наиболее важных параметров, от которых зависит безопасность эксплуатации реактора. Так, в соответствии с требованиями технологического регламента по безопасности эксплуатации АЭС, установлена максимально допустимая температура топливного сердечника твэла (1963 К) [13]. Таким образом, определение данного параметра при моделировании твэлов представляет особый интерес.

Для каждого варианта расчета определялось относительное отклонение:

$$\delta T_{\max} = \frac{|T_{\max}^{\text{COMSOL}} - T_{\max}^{\text{ANSYS}}|}{T_{\max}} \cdot 100 \%, \quad (11)$$

где δT_{\max} – относительное отклонение при определении максимальной температуры в разных пакетах, %; T_{\max}^{COMSOL} – максимальная температура топлива, полученная в пакете COMSOL Multiphysics, К; T_{\max}^{ANSYS} – максимальная температура топлива, полученная в пакете ANSYS Fluent, К; T_{\max} – максимальная температура из рассматриваемых, К.

Результаты, полученные для двумерной постановки задачи без учета отверстия и оболочки твэла, указаны в табл. 2. Температурное поле твэла приведено на рис. 5.

Результаты, полученные для трехмерной постановки с отверстием внутри твэла без учета оболочки, с учетом радиационной составляющей теплообмена внутри таблетки, указаны в табл. 3. Температурное поле твэла приведено на рис. 6.

Таблица 2. Максимальные температуры топлива при двумерной постановке задачи без учета отверстия и оболочки твэла

Процент обогащения, %	$Q_{уд}$, МВт/м ³	T_{max}^{COMSOL} , К	T_{max}^{ANSYS} , К	δT_{max} , %
1,6	139,897	813,52	812,57	0,12
2	156,685	844,16	843,02	0,13
2,4	167,877	865,09	863,90	0,14
3	191,859	910,94	910,14	0,09
3,6	239,824	1005,36	1008,73	0,33
4	237,825	1001,36	1004,45	0,31
4,4	265,805	1057,92	1065,67	0,73
4,95	270,468	1067,54	1076,20	0,80
5	273,577	1074,00	1083,28	0,86

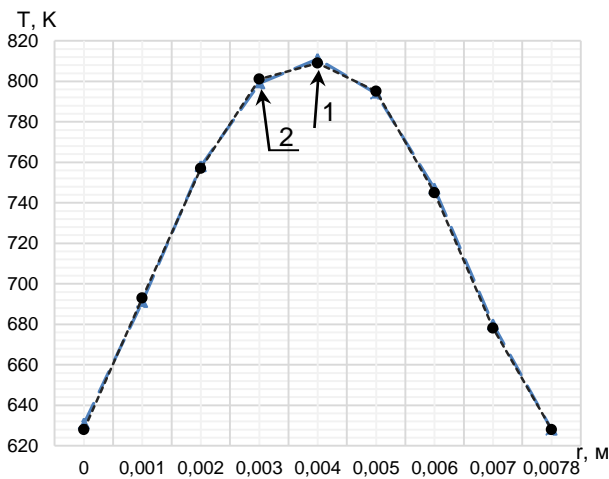


Рис. 5. Температурное поле твэла при двумерной постановке задачи без учета отверстия и оболочки твэла: 1 – COMSOL Multiphysics; 2 – ANSYS Fluent

Таблица 3. Максимальные температуры топлива при трехмерной постановке задачи с отверстием внутри твэла без учета оболочки, с учетом радиационной составляющей теплообмена внутри таблетки

Процент обогащения, %	$Q_{уд}$, МВт/м ³	T_{max}^{COMSOL} , К	T_{max}^{ANSYS} , К	δT_{max} , %
1,6	139,897	667,69	665,35	0,35
2	156,685	676,97	674,61	0,35
2,4	167,877	683,21	680,63	0,38
3	191,859	696,74	695,05	0,24
3,6	239,824	724,36	721,50	0,39
4	237,825	723,20	720,34	0,40
4,4	265,805	739,60	736,73	0,39
4,95	270,468	742,37	739,49	0,39
5	273,577	744,21	741,33	0,39

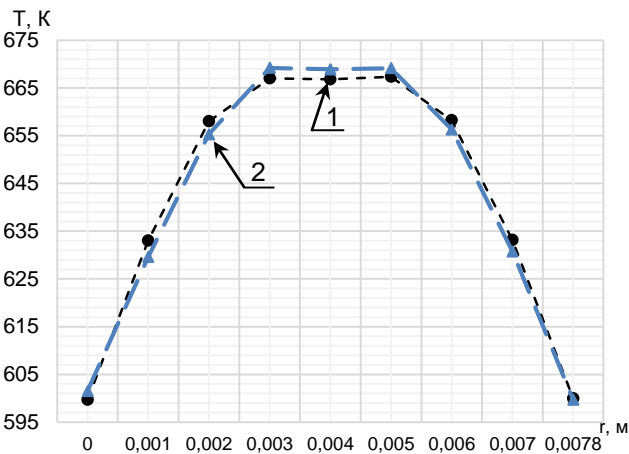


Рис. 6. Температурное поле твэла при трехмерной постановке с отверстием внутри твэла без учета оболочки, с учетом радиационной составляющей теплообмена внутри таблетки: 1 – COMSOL Multiphysics; 2 – ANSYS Fluent

Результаты, полученные для двумерной постановки задачи с учетом оболочки твэла, указаны в табл. 4. Температурное поле твэла приведено на рис. 7.

Таблица 4. Максимальные температуры топлива при двумерной постановке задачи с учетом оболочки твэла

Процент обогащения, %	$Q_{уд}$, МВт/м ³	T_{max}^{COMSOL} , К	T_{max}^{ANSYS} , К	δT_{max} , %
1,6	139,897	1028,12	1033,20	0,49
2	156,685	1091,99	1098,90	0,63
2,4	167,877	1135,89	1143,92	0,70
3	191,859	1232,47	1243,56	0,89
3,6	239,824	1438,97	1452,74	0,95
4	237,825	1429,89	1443,60	0,95
4,4	265,805	1558,41	1573,20	0,94
4,95	270,468	1580,22	1595,60	0,96
5	273,577	1594,94	1610,04	0,94

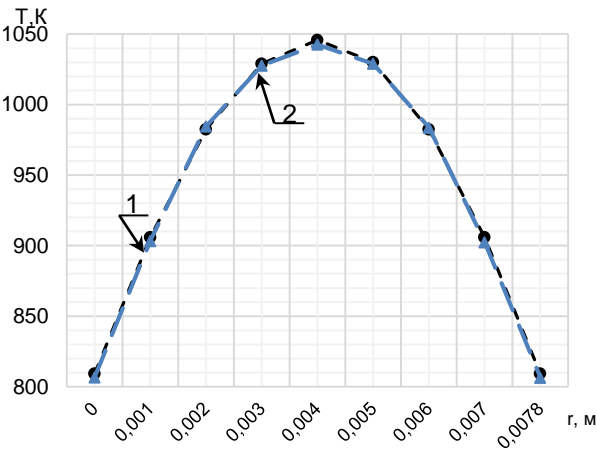


Рис. 7. Температурное поле твэла при двумерной постановке задачи с учетом оболочки твэла: 1 – COMSOL Multiphysics; 2 – ANSYS Fluent

В результате проведенного моделирования максимальное относительное отклонение при определении максимальной температуры твэла в двух программных комплексах составило менее 1 %. Графики относительных отклонений для всех трех задач приведены на рис. 8.

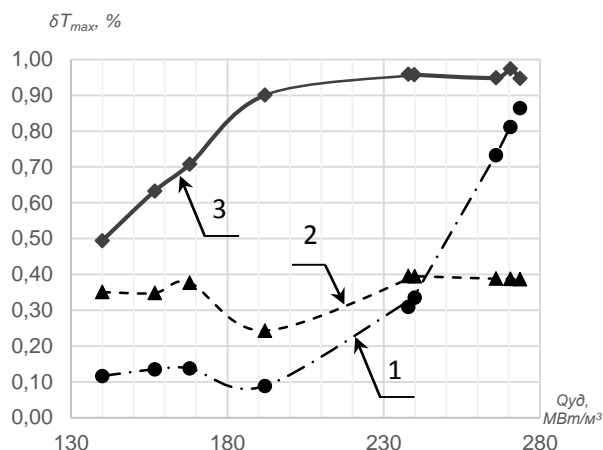


Рис. 8. Зависимость относительного отклонения найденных максимальных температур в разных пакетах от удельной мощности, выделяемой 1 м³ топлива: 1 – задача без оболочки и отверстия; 2 – задача с отверстием, 3 – задача с оболочкой

Выводы. Предложенные три компьютерные модели твэлов реактора ВВЭР-1000, построенные при помощи двух программных комплексов – COMSOL Multiphysics и ANSYS Fluent, позволили определить и построить температурные поля твэлов с учетом различных начальных условий и постановок задач. Также были определены максимальные температуры топливного сердечника твэлов. Полученные температуры сравнивались для двух используемых пакетов в целях проведения кросс-верификации. В результате максимальное относительное отклонение составило 0,96 %.

В системах температурных измерений реакторов применяются два метода – термоэлектрический и термосопротивления. При этом для внутризонных измерений применяются только термоэлектрические преобразователи. Их погрешность составляет $\pm(1-2) \%$ [16]. Таким образом, полученная точность определения температуры в двух пакетах при помощи разработанных моделей соответствует погрешности измерительных приборов. Это подтверждает, что COMSOL Multiphysics может использо-

ваться для моделирования теплофизических процессов в реакторах ВВЭР наравне с ANSYS Fluent.

Список литературы

1. Horvath A., Rachlew E. Nuclear power in the 21st century: Challenges and possibilities // *Ambio*. – 2016. – Vol. 45. – P. 38–49. DOI: 10.1007/s13280-015-0732-y.
2. Ramana M.V. Small Modular and Advanced Nuclear Reactors: A Reality Check // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 42090–42099. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3064948.
3. Разработка модели по определению температурного поля твэла в двумерной постановке задачи / В.А. Горбунов, Н.Б. Иванова, Н.А. Лоншаков, Я.В. Белов // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 2019. – № 2. – С. 174–184.
4. Старков В.А., Марихин Н.Ю. Методика и программа расчета стационарного температурного поля в системе многозонных цилиндрических ТВЭЛов // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 2013. – № 1. – С. 54–62.
5. Горбунов В.А., Андрианов С.Г., Коновальцева С.С. Оценка влияния радиационного теплообмена на параметры температурных полей твэлов различного конструктивного исполнения // *Вестник ИГЭУ*. – 2021. – Вып. 2. – С. 23–31.
6. Исследование влияния конструктивного параметра тепловыделяющего элемента на коэффициент неравномерности теплового выделения по высоте реактора ВВЭР-1000 / В.А. Горбунов, С.С. Теплякова, Н.А. Лоншаков и др. // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 2023. – № 2. – С. 27–40.
7. Heat Transfer Module User's Guide, Version COMSOL 3.5, 2008. – 296 с. – URL: <https://extras.csc.fi/math/comsol/3.5/doc/ht/htug.pdf>
8. Бруйка В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.
9. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учебник / С.М. Дмитриев, Д.Л. Зверев, О.А. Бых и др. – М.: Машиностроение, 2013. – 415 с.
10. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
11. Горбунов В.А. Теплогидравлические процессы в ядерных реакторах: учеб. пособие / ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2018. – 183 с.
12. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.
13. Колпаков Г.Н., Селиваникова О.В. Конструкция твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2009. – 118 с.

14. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

15. **Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г.** Циркониевые сплавы в атомной энергетике. – М.: Энергоиздат, 1981. – 232 с.

16. **Машиностроение** ядерной техники. Т. IV-25. Кн. 2 / Е.О. Адамов, П.В. Андреев, С.А. Антипов и др. – М.: Машиностроение, 2005. – 944 с.

References

1. Horvath, A., Rachlew, E. Nuclear power in the 21st century: Challenges and possibilities. *Ambio*, 2016, vol. 45, pp. 38–49. DOI: 10.1007/s13280-015-0732-y.

2. Ramana, M.V. Small Modular and Advanced Nuclear Reactors: A Reality Check. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 42090–42099. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3064948.

3. Gorbunov, V.A., Ivanova, N.B., Lonshakov, N.A., Belov, Ya.V. Razrabotka modeli po opredeleniyu temperaturnogo polya tvela v dvumernoy postanovke zadachi [Development of model for determination of temperature fields of fuel elements in two-dimensional formulation of the problem]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2019, no. 2, pp. 174–184.

4. Starkov, V.A., Marikhin, N.Yu. Metodika i programma rascheta statsionarnogo temperaturnogo polya v sisteme mnogozonnykh tsilindricheskikh TVElov [Method and program of calculation of stationary temperature field in the system of multizone cylindrical fuel elements]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2013, no. 1, pp. 54–62.

5. Gorbunov, V.A., Andrianov, S.G., Konoval'tseva, S.S. Otsenka vliyaniya radiatsionnogo teploobmena na parametry temperaturnykh poley tvelov razlichnogo konstruktivnogo ispolneniya [Assessment of radiation heat transfer influence on parameters of temperature fields of various design fuel rods]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 2, pp. 23–31.

6. Gorbunov, V.A., Teplyakova, S.S., Lonshakov, N.A., Andrianov, S.G., Mineev, P.A. Issledovanie vliyaniya konstruktivnogo parametra teplovydelyayushchego elementa na koeffitsient neravnomernosti teplovogo vydeleniya po vysote reaktora VVER-1000

[Investigation of the influence of the fuel element design parameter in the VVER-1000 reactor axial power peaking factor]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2023, no. 2, pp. 27–40.

7. Heat Transfer Module User's Guide, Version COMSOL 3.5, 2008. 296 p. Available at: <https://extras.csc.fi/math/comsol/3.5/doc/ht/htug.pdf>

8. Bruyaka, V.A. *Inzhenernyy analiz v ANSYS Workbench* [Engineering Analysis in ANSYS Workbench]. Samara: Samarskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2010. 271 p.

9. Dmitriev, S.M., Zverev, D.L., Bykh, O.A., Panov, Yu.K., Sorokin, N.M., Farafonov, V.A. *Osnovnoe oborudovanie AES s korpusnymi reaktorami na teplovykh neytronakh* [Basic equipment of nuclear power plants with pressure vessel reactors on thermal neutrons]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2013. 415 p.

10. Dement'ev, B.A. *Yadernye energeticheskie reaktory* [Nuclear power reactors]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 352 p.

11. Gorbunov, V.A. *Teplogidravlicheskie protsessy v yadernykh reaktorakh* [Thermohydraulic processes in nuclear reactors]. Ivanovo, 2018. 183 p.

12. Chirkin, V.S. *Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoy tekhniki* [Thermophysical properties of nuclear technology materials]. Moscow: Atomizdat, 1968. 484 p.

13. Kolpakov, G.N., Selivanikova, O.V. *Konstruktsiya tvelov, kanalov i aktivnykh zon energeticheskikh reaktorov* [Designs of fuel elements, channels and cores of power reactors]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009. 118 p.

14. Vargaftik, N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook of Thermophysical Properties of Gases and Liquids]. Moscow: Nauka, 1972. 720 p.

15. Zaymovskiy, A.S., Nikulina, A.V., Reshetnikov, N.G. *Tsirkonievye splavy v atomnoy energetike* [Zirconium alloys in nuclear energy]. Moscow: Energoizdat, 1981. 232 p.

16. Adamov, E.O., Andreev, P.V., Antipov, S.A., Arzhaev, A.I. *Mashinostroyeniye yadernoy tekhniki. T. IV-25. Kn. 2* [Mechanical engineering of nuclear technology. Vol. IV-25, book 2]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2005. 944 p.

УДК. 621.1

Алексей Борисович Бирюков

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, проректор, Россия, Донецк, e-mail: birukov.ttf@gmail.com

Юлия Олеговна Турулина

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», аспирант факультета металлургии и теплоэнергетики, Россия, Донецк, e-mail: turulinay@mail.ru

Инженерная методика определения температурного состояния металла при его нагреве

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время определение температурного профиля печи, требуемого для обеспечения заданных параметров нагрева металла, производится с использованием метода термометрирования или математических моделей, как правило базирующихся на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности. Ранее широко использовался метод тепловой диаграммы И.Д. Семикина, позволяющий при заданных условиях нагрева определить его продолжительность. На практике востребованной является разработка простого инженерного метода, который позволял бы с достаточной точностью определять температурное поле металла для заданных условий нагрева.

Материалы и методы. В основе разработки лежит метод тепловой диаграммы И.Д. Семикина. Но при этом итоговое уравнение, описывающее тепловой баланс металла в пределах зоны печи, решается относительно энтальпии металла на выходе из зоны, а заданные условия нагрева (производительность, температура зоны) используются для определения величин, входящих в правую часть уравнения (время нагрева, средняя плотность теплового потока).

Результаты. Предложена методика, которая для проходных печей различного типа (толкательных и с механизированным подом) позволяет для заданных производительности и температурного профиля печи рассчитать изменение температурного состояния металла для всех зон нагрева, начиная от момента загрузки до выдачи металла. Адекватность предложенной методики проверена для двух типов печей. Для методических толкательных печей полученные результаты сопоставлены с результатами моделирования температурного состояния металла при помощи численного метода. Установлено, что расхождение результатов после прохождения инерционного периода нагрева не превышает 1 %. Для печи с шагающими балками сопоставлено расчетное значение температуры поверхности металла после печи с результатами оперативных измерений. Установлено расхождение менее 2 %.

Выводы. Совокупность полученных результатов обеспечивает достижение цели исследования. Предложенный метод, основанный на уравнении теплового баланса, позволяет считать его абсолютно корректным, является инженерным и достаточно простым в реализации. Метод рекомендуется использовать при проектировании печей и для расчетной корректировки температурного профиля печи силами технических отделов металлургических предприятий.

Ключевые слова: проходная печь, температурный профиль, оптимальный режим нагрева, математическая модель, инженерный метод

Aleksei Borisovich Birukov

Donetsk National Technical University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Head of Engineering Thermophysics Department, Vice Rector, Russia, Donetsk, e-mail: birukov.ttf@gmail.com

Julia Olegovna Turulina

Donetsk National Technical University, Postgraduate Student of Metallurgy and Thermal Power Engineering Department, Russia, Donetsk, e-mail: turulinay@mail.ru

Engineering method to determine metal temperature state when it is heated

Abstract

Background. Currently, the determination of the temperature profile of the furnace required to ensure the specified heating parameters of the metal is carried out using the temperature measurement method or mathematical models. They are most based on solution of the differential equation of non-stationary thermal conductivity. Previously, the thermal diagram method of I.D. Semikin was widely used. It allows us, under given heating conditions, to determine heating duration. In practice, it is important to develop a simple engineering method that would allow the temperature field of the metal to be determined with sufficient accuracy under given heating conditions.

Materials and methods. The development is based on the thermal diagram method of I.D. Semikina. But at the same time, the final equation describing the heat balance of the metal within the furnace zone is solved relative to the enthalpy of the metal at the exit from the zone. The specified heating conditions (productivity, zone temperature) are used to determine the quantities of the right-hand side of the equation (time heating, average heat flux density).

Results. The authors have proposed the method for continuous furnaces of various types (push-type and with a mechanized hearth) that allows us for a given productivity and temperature profile of the furnace to calculate the change in the temperature state of the metal for all heating zones, from the moment of loading to the release of metal. The adequacy of the proposed methodology has been tested for two types of furnaces. For methodical push-type furnaces, the results obtained have been compared to the results of modeling the temperature state of the metal using a numerical method. The discrepancy between the results after passing the inertial heating period does not exceed 1 %. For a walking-beam furnace the calculated value of the metal surface temperature after the furnace has been compared with the results of operational measurements. The discrepancy is less than 2 %.

Conclusions. The totality of the results obtained ensures the achievement of the research goal. The proposed method is based on the heat balance equation and allows us to consider it to be correct. It is an engineering method and quite simple to implement. The method is recommended to be used to design furnaces and to calculate the temperature profile of furnaces by engineering departments of metallurgical enterprises.

Key words: continuous furnace, temperature profile, optimal heating mode, mathematical model, engineering method

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.024-031

Введение. Для нагрева металла перед его дальнейшей прокаткой в основном применяются непрерывно работающие проходные печи, преимущественно методические. В зависимости от типа и производительности прокатного стана применяются печи с различным числом отапливаемых зон, с односторонним или двусторонним нагревом заготовок. Заготовки последовательно нагреваются в методической, сварочной и томильной зонах. Металл поступает в методическую зону (если таковая имеется), где постепенно нагревается поступающими из отапливаемых зон продуктами сгорания. В сварочных зонах происходит интенсивный нагрев заготовок и температура металла приближается к заданной. В томильной зоне достигается надлежащая равномерность нагрева заготовок. Для термически тонкого тела наличие томильной зоны необязательно.

При работе печи в условиях переменной производительности с точки зрения энергетической эффективности и снижения материальных затрат в прокатном производстве необходима отработка оптимальных режимов нагрева, при которых значительно снижаются потери с окалиной, не возникают перерасход топлива, недогрев или перегрев заготовок, повышаются пластичность и однородность нагрева металла [1, 2].

При этом актуальной задачей является определение температуры металла в зависимости от производительности и температурного профиля печи.

Состояние вопроса. Вопросу оптимизации нагрева металла в проходных печах посвящено множество работ [3–5]. Все они рассматривают разные подходы, однако отмечается общая закономерность – перенос максимальной тепловой нагрузки на последние по ходу движения металла зоны

печи, что позволяет значительно снизить расход топлива. Следует отметить, что для каждого отдельного случая необходима отработка соответствующих режимов нагрева.

Определение режимных параметров проходных печей происходит с использованием метода термометрирования или путем построения математических моделей.

Метод термометрирования позволяет непосредственно измерять температурный профиль заготовки, проходящей через печь. Измерения осуществляются с помощью термопар, закрепленных внутри заготовки и передающих сигнал по термоизолированному кабелю. Также возможно применение многоканального регистратора данных, который устанавливается на заготовке в специальном теплоизолирующем контейнере. Все полученные данные анализируются на персональном компьютере.

Широкое распространение получили косвенные методы определения температурного состояния заготовок, основанные на замерах температуры поверхности с помощью пирометров [4, 5]. При использовании этих методов необходимо учитывать особенности лучистого теплообмена в системе «газ–кладка–металл».

На основании метода термометрирования возможно формирование технологических карт для нагрева заготовок в печах, прошедших реконструкцию или впервые вводимых в эксплуатацию, при смене сортамента или геометрических характеристик заготовок. При этом метод термометрирования не учитывает всех возможных сочетаний параметров из-за периодичности процессов измерений. В связи с этим наибольшее распространение для определения оптимальных режимов нагрева получило математическое моделирование процесса.

В зависимости от цели моделирования, могут применяться различные по полноте и сложности математические модели, позволяющие исследовать закономерности и характеристики процессов нагрева, а в ряде случаев использовать модель как элемент в системе управления.

Большое распространение получили модели, основанные на решении уравнения теплопроводности [6], позволяющие описать процесс нагрева в печи с учетом изменения теплофизических свойств металла и граничных условий. При этом тем-

пературный профиль печи и начальное состояние металла считаются известными.

В качестве расчетной методики ранее широко применялся метод тепловой диаграммы И.Д. Семикина, получивший развитие в работе В.Л. Гусовского и А.Е. Лифшица [7], который позволяет при заданных условиях нагрева определить его продолжительность. Теплофизические и геометрические характеристики, а также температурное состояние металла в начале и конце нагрева считаются известными. Задается распределение температуры греющей среды по длине печи и принимается расчетная схема нагрева.

В некоторых случаях при расчетных схемах нагрева задается продолжительность нагрева на расчетном участке, а затем соотношение этих величин проверяется.

В случае нагрева термически массивного тела продолжительность его пребывания в печи определяется с помощью тепловой диаграммы И.Д. Семикина или по формуле

$$\tau = \frac{\rho r_0 \cdot 10^3}{3600 \cdot K_1 \bar{q}} (i_k - i_n), \quad (1)$$

где τ – продолжительность нагрева металла, ч; r_0 – толщина прогреваемого слоя, м; ρ – плотность металла, кг/м³; K_1 – коэффициент материальной нагрузки; \bar{q} – средняя плотность теплового потока, Вт/м²; i_k – энтальпия металла в конце нагрева, кДж/кг; i_n – энтальпия металла в начале нагрева, кДж/кг.

При невыполнении технологических ограничений, накладываемых на процесс нагрева, корректируется значение температуры уходящих газов или меняются соотношения длин зон.

Данная расчетная методика используется при выполнении поверочных расчетов для существующих тепловых режимов проходной печи, при разработке новых более экономичных режимов, а также для проектирования технологических карт нагрева.

Расчетно-экспериментальные методы [8, 9] позволяют разработать технологию нагрева, позволяющую минимизировать расход топлива.

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных вопросу оптимизации процесса нагрева, в настоящее время по-прежнему существует необходимость разработки простой и удобной методики определения температуры металла при его

нагреве, особенно при работе печи в условиях переменной производительности.

В связи с этим целью настоящего исследования является разработка методики определения температуры металла при заданных производительности, температурах газа в зонах печи и времени пребывания в них.

Методы исследования. В приведенных выше работах метод тепловой диаграммы И.Д. Семикина используется для определения продолжительности нагрева металла в зоне при заданной температуре печи, в результате чего достигается заданная среднемассовая температура металла и качество нагрева.

Предлагаемый нами новый метод позволяет при заданной температуре газа в зоне печи и продолжительности нагрева, соответствующей длине зоны и производительности печи, определить температурное состояние металла в конце зоны.

Алгоритм расчета сводится к следующему.

В соответствующей зоне печи по заданной производительности определяются скорость и продолжительность нагрева металла.

Скорость движения заготовки в толкательной методической печи определяется по формуле

$$v = \frac{P \cdot 10^3}{3600 \cdot d l_3 \rho}, \quad (2)$$

где v – скорость движения заготовок в печи или соответствующей зоне, м/с; P – производительность печи, т/ч; d – толщина заготовки, м; l_3 – длина заготовки, м.

Продолжительность нагрева заготовки составляет

$$\tau = \frac{L}{3600 \cdot v}, \quad (3)$$

где L – длина печи или соответствующей зоны, м.

Задается распределение температур печи по зонам.

Также задается температурное состояние металла на входе в зону печи, для которой ведется расчет. Если это первая от загрузки зона, то задаются температура поверхности и среднемассовая температура, соответствующие температурному состоянию металла, поступающего в печь. Для последующих зон в качестве исходных данных задаются характерные температуры металла, полученные в результате расчета предыдущих зон.

Процесс определения температуры поверхности металла является итерационным и сводится к следующему.

Предварительно задается температура поверхности заготовки в конце рассматриваемой зоны печи. Для нее определяется плотность теплового потока, падающего на поверхность металла в конце зоны.

Средняя плотность теплового потока, поступающего на поверхность металла в пределах зоны, определяется по формуле

$$\bar{q} = \frac{q_i - q_{i+1}}{\ln q_i / q_{i+1}}, \text{ если } q_i / q_{i+1} \geq 2, \quad (4)$$

иначе

$$\bar{q} = \frac{q_i + q_{i+1}}{2}, \quad (5)$$

где q_i – плотность теплового потока в начале соответствующей зоны, Вт/м²; q_{i+1} – плотность теплового потока в конце соответствующей зоны, Вт/м².

При наличии методической зоны средняя плотность теплового потока в ней определяется по формуле [4]

$$\bar{q} = \sqrt{q_0 \cdot q_1}, \quad (6)$$

где q_0 – плотность теплового потока в начале нагрева, Вт/м²; q_1 – плотность теплового потока в конце методической зоны печи, Вт/м².

Плотность теплового потока в начале и конце соответствующей зоны печи определяются по формулам:

$$q_i = C_{\text{гкм}} \left[\left(\frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}^i}{100} \right)^4 \right], \quad (7)$$

$$q_{i+1} = C_{\text{гкм}} \left[\left(\frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}^{i+1}}{100} \right)^4 \right], \quad (8)$$

где $C_{\text{гкм}}$ – приведенный коэффициент излучения в системе «газ–кладка–металл», определяемый с учетом значений степеней черноты поверхности металла и продуктов сгорания и угловых коэффициентов в системе, Вт/(м²·К⁴); $T_{\text{г}}$ – температура газа в соответствующей зоне печи, К; $T_{\text{пов}}^i$, $T_{\text{пов}}^{i+1}$ – температура поверхности металла в начале и конце зоны соответственно, К.

Приведенный коэффициент излучения определяется для каждой зоны по формуле

$$C_{\text{гкм}} = C_0 \varepsilon_{\text{м}} \frac{w + 1 - \varepsilon}{w + [\varepsilon_{\text{м}} + \varepsilon (1 - \varepsilon_{\text{м}})] \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}}, \quad (9)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела ($C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$); $\varepsilon_m, \varepsilon$ – степень черноты металла и дымовых газов для каждой из зон соответственно; w – степень развития кладки для соответствующей зоны печи.

Далее вычисляется среднемассовая энтальпия заготовки в конце зоны по формуле

$$i_k = \frac{\tau \cdot 3600 \cdot K_1 \bar{q}}{\rho r_0 \cdot 10^3} + i_n. \quad (10)$$

Путем интерполяции табличных данных по значению среднемассовой энтальпии определяется среднемассовая температура заготовки в конце соответствующей зоны нагрева.

Температура поверхности заготовки определяется по формуле

$$t_n = \bar{t} + \frac{qr_0}{K_2 \lambda} \frac{K_3 - 1}{K_3}, \quad (11)$$

где t_n – температура поверхности заготовки в конце зоны, °С; \bar{t} – среднемассовая температура заготовки в конце зоны, °С; q – плотность теплового потока в конце соответствующей зоны, Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности материала заготовки при t_n , Вт/(м·К); K_2, K_3 – коэффициенты усреднения плотности теплового потока и температуры, определяемые в зависимости от величины критерия Био путем интерполяции табличных данных [10].

Если полученная по формуле (11) температура поверхности заготовки отличается от предварительно заданной, расчет повторяется, начиная с определения плотности теплового потока. При этом температура поверхности металла, полученная по формуле (11), принимается в качестве исходной величины.

Итерационный расчет продолжается до тех пор, пока не будет достигнута сходимость температуры поверхности заготовки в пределах заданной погрешности (до 1 %).

Выполняя аналогичным образом расчеты для последующих зон нагрева, получаем конечное температурное состояние металла.

Преимуществом предложенной методики является то, что с ее помощью можно рассчитывать температурное состояние металла как для толкательных печей, в которых условно считаем, что нагреваемый металл имеет форму плиты,

так и для печей с механизированным подом, в которых зазоры между заготовками и их влияние на параметры нагрева можно учесть с помощью коэффициента несимметричности [11, 12].

Проверка адекватности предложенной методики проведена для двух типов печей: для методических толкательных печей – путем сопоставления результатов, полученных по предложенной методике, с результатами моделирования температурного состояния металла в методической толкательной печи, полученными при помощи численного метода; для печи с шагающими балками – путем сопоставления расчетного значения температуры поверхности металла на выходе из печи с результатами оперативных измерений.

Для проведения численных экспериментов использована описанная ниже математическая модель. С помощью численного метода разностной аппроксимации в виде явной конечно-разностной схемы дана оценка адекватности рассчитанных режимных параметров.

Основное дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (12)$$

где t – температура металла, °С; a – коэффициент температуропроводности металла, м²/с.

После замены бесконечно малых величин на конечные разности получаем

$$\frac{t_i^{k+1} - t_i^k}{\Delta \tau} = a \frac{(t_{i+1}^k - t_i^k) - (t_i^k - t_{i-1}^k)}{\Delta x^2}, \quad (13)$$

где t_i^k, t_i^{k+1} – температура в i -й точке в момент времени k и в последующий момент времени $k+1$ соответственно, °С; t_{i+1}^k, t_{i-1}^k – температура в момент времени k в последующей $i+1$ -й точке и в предыдущей $i-1$ -й точке соответственно, °С; $\Delta \tau$ – шаг по времени, с; Δx – шаг по координате, м.

Геометрические условия для одномерной задачи представлены отрезком, концами которого являются середины противоположных граней, проходящим через центр поперечного сечения заготовки.

В качестве начальных условий принято, что в «нулевой» момент времени температуры всех точек на расчетном отрезке соответствуют температурному состоянию металла, поступающего в печь.

В качестве граничных условий на наружных поверхностях металла задаются граничные условия III рода:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha (t_r - t_n), \quad (14)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); t_r – температура газа, °С; t_n – температура поверхности заготовки, °С.

Для примера выполнен расчет нагрева прямоугольной заготовки 150×150 мм в пятизонной методической толкательной печи. Процесс описывается как одномерная задача для бесконечной пластины. Начальная температура металла 20 °С. Температуры по зонам: 1015 °С – для подогревательной зоны; 1185 °С и 1205 °С – для сварочных зон; 1215 °С и 1230 °С – для последних зон.

За основную расчетную формулу принимаем

$$t_i^{k+1} = t_i^k \left(1 - 2 \frac{a \Delta \tau}{\Delta x^2} \right) + \frac{a \Delta \tau}{\Delta x^2} (t_{i+1}^k + t_{i-1}^k). \quad (15)$$

Температура на поверхностях заготовки при двустороннем нагреве определяется по формулам:

$$t_{n1} = \frac{1}{1 + \alpha \Delta x / \lambda} t_2 + \frac{\alpha t_r \Delta x / \lambda}{1 + \alpha \Delta x / \lambda}; \quad (16)$$

$$t_{n2} = \frac{\lambda / \Delta x}{\lambda / \Delta x + \alpha} t_{n-1} + \frac{\alpha t_r}{\lambda / \Delta x + \alpha}, \quad (17)$$

где t_{n1} , t_{n2} – температуры в узлах расчетной сетки на поверхностях заготовки, °С; t_2 , t_{n-1} – температуры в узлах расчетной сетки, со-

седних с соответствующими поверхностными узлами, °С.

Необходимым является условие устойчивости явной конечно-разностной схемы, которое проверяется по формуле

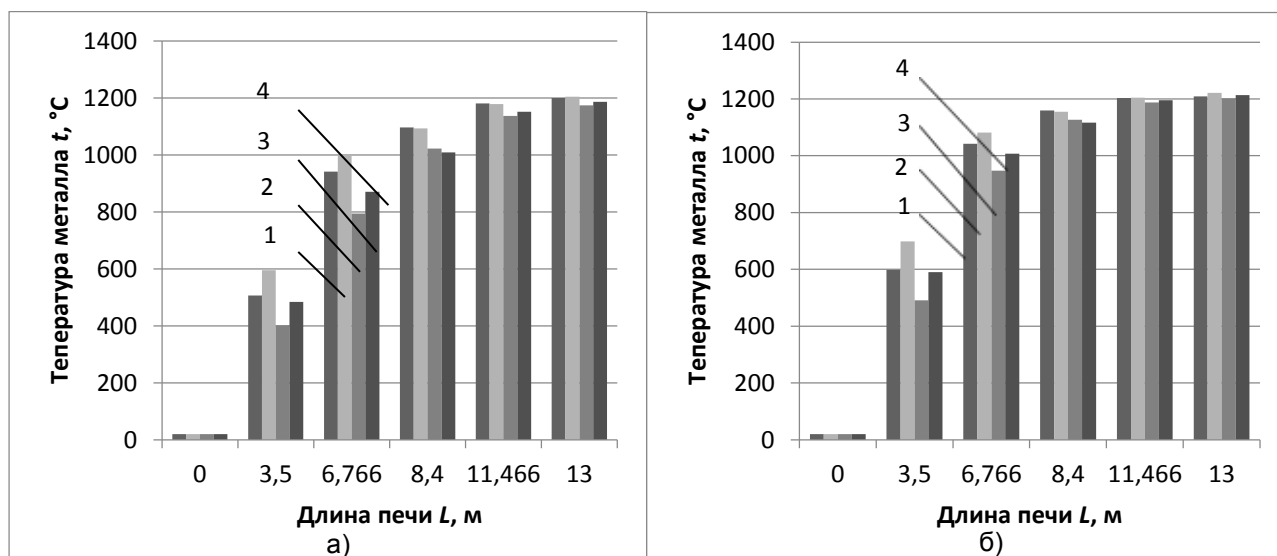
$$a \Delta \tau \leq 0,5 \Delta x^2. \quad (18)$$

Гистограммы на рисунке позволяют наглядно сравнить температуры металла по длине печи, полученные с помощью численного метода, и температуры, полученные с помощью предложенной методики, при различной производительности печи (120 и 90 т/ч).

Анализ гистограмм показывает, что для обеих производительностей во время инерционного периода наблюдается расхождение результатов не более 15 %. Далее по мере прогрева металла и до самой его выдачи из печи отличие результатов не превышает 1 %.

Также подтверждение адекватности предложенной методики получено при расчете нагрева металла в методической комбинированной нагревательной печи с шагающими водоохлаждающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода.

Печь имеет верхние и нижние подогревательные, нагревательные и томильные зоны с температурами газа: 1015 °С – в подогревательных зонах; 1210 °С и 1250 °С – в нагревательных зонах; 1200 °С и 1230 °С – в томильных зонах.



Температура поверхности и центра заготовки по длине печи для различных производительностей: а – 120 т/ч; б – 90 т/ч; 1 – температура поверхности металла, полученная с помощью предложенного метода; 2 – температура поверхности металла, полученная с помощью численного метода; 3 – температура центра металла, полученная с помощью предложенного метода; 4 – температура центра металла, полученная с помощью численного метода

Согласно инструкции по нагреву, заготовки, выдаваемые из печи, должны быть равномерно нагреты до заданной температуры 1100–1180 °С.

Расчет выполнялся для заготовок размером 150×150 мм в печи длиной 13 м производительностью 127 т/ч.

В результате получена температура поверхности металла на выходе из печи 1125 °С, что входит в требуемый диапазон.

В результате прямого измерения температуры поверхности заготовки, выдаваемой из печи, при помощи штатного пирометра получено значение 1121 ± 11 °С

Таким образом, расхождение между расчетным значением температуры и значением температуры, полученным по результатам оперативных измерений, не превышает 2 %.

Выводы. Анализ литературных источников показал, что, несмотря на большое количество работ по усовершенствованию процесса нагрева металла в проходных печах, имеются резервы по сокращению энергозатрат и улучшению качества нагрева. Важная роль при этом отводится совершенствованию методов расчетного определения температурного состояния металла в зависимости от параметров нагрева.

Предложенный новый способ использования тепловой диаграммы И.Д. Семикина позволяет определить температуру металла по зонам и в конце нагрева. Данный метод базируется на уравнении теплового баланса, что позволяет считать его абсолютно корректным, является инженерным и достаточно простым в реализации.

К недостаткам методики можно отнести то обстоятельство, что для получения результатов необходимо усреднение тепловых потоков и теплофизических характеристик металла.

Метод рекомендуется использовать при проектировании печей и для расчетной корректировки температурного профиля печи силами технических отделов металлургических предприятий.

С помощью численного метода подтверждена правомерность использования методики определения температуры металла. Корректировка существующих режимов с использованием предложенной методики позволяет повысить качество нагрева металла при переменной производительности печи.

При адаптации расчетного метода к условиям реального производства на Макеевском металлургическом заводе подтверждена сходимость рассчитанной температуры металла с фактическими показателями с достаточной степенью точности (погрешность не более 2 %).

Список литературы

1. **Основные** методы оптимизации режимов нагрева металла / С.М. Козлов, В.И. Тимошпольский, В.Б. Ковалевский и др. // Литье и металлургия. – 2000. – № 3. – С. 68–71.
2. **Парсункин Б.Н., Бушманова М.В., Андреев С.М.** Энергосберегающий режим нагрева металла в нагревательных печах // Автоматизированный печной агрегат – основа энергосберегающих технологий XXI века: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – М.: МИСиС, 2000. – С. 243–244.
3. **Панферов В.И.** Об экономичном управлении нагревом металла в промышленных печах // Вестник ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 71–80.
4. **Панферов В.И.** О расчетно-инструментальном контроле качества нагрева и термообработки металла в печах // Вестник ЮУрГУ. Сер. Металлургия. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 56–66.
5. **Вырк А.Х.** Управление нагревом заготовок в методической печи // Бюлл. ЦНИИЧМ. – 1970. – № 24. – С. 3–9.
6. **Ткаченко В.Н.** Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов. Т. 13. – Киев: Наукова думка, 2008. – 244 с.
7. **Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е.** Методики расчета нагревательных и термических печей: учебно-справочное издание. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.
8. **Андреев С.М., Парсункин Б.Н.** Экспериментальное исследование эффективности энергосберегающих оптимальных режимов нагрева металла // Автоматизированные технологии и производства. – 2014. – № 6. – С. 134–143.
9. **Курносое В.В., Левицкий И.А.** Математическое моделирование нагрева заготовок с переменными теплофизическими характеристиками и теплового режима, соответствующего заданному графику нагрева // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2015. – Т. 55, № 7. – С. 19–22.
10. **Казанцев Е.И.** Промышленные печи. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
11. **Бирюков А.Б., Турулина Ю.О.** Совершенствование расчетного метода определения рациональных режимных параметров проходной печи с механизированным подом,

работающей в условиях переменной производительности // Вестник Донецкого национального университета. Сер. Г: Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 52–56.

12. **Теплотехнические** расчеты металлургических печей / Б.Ф. Зобнин, М.Д. Казяев, Б.И. Китаев и др. – М.: Металлургия, 1982. – 358 с.

References

1. Kozlov, S.M., Timoshpol'skiy, V.I., Kovalevskiy, V.B., Filippov, V.V., D'yachenko, Yu.V., Trusova, I.A. Osnovnye metody optimizatsii rezhimov nagreva metalla [Basic methods for optimizing metal heating modes]. *Lit'e i metallurgiya*, 2000, no. 3, pp. 68–71.
2. Parsunkin, B.N., Bushmanova, M.V., Andreev, S.M. Energoberegayushchiy rezhim nagreva metalla v nagrevatel'nykh pechakh [Energy-saving mode of heating metal in heating furnaces]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Avtomatizirovanny pechnoy agregat – osnova energoberegayushchikh tekhnologiy XXI veka»* [Materials of an international scientific and practical conference “Automated furnace unit – the basis of energy-saving technologies of the 21st century”]. Moscow: MISiS, 2000, pp. 243–244.
3. Panferov, V.I. Ob ekonomichnom upravlenii nagrevom metalla v promyshlennykh pechakh [On economical control of metal heating in industrial furnaces]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 71–80.
4. Panferov, V.I. O raschetno-instrumental'nom kontrole kachestva nagreva i termoobrabotki metalla v pechakh [About calculation and instrumental control of the quality of heating and heat treatment of metal in furnaces]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Metallurgiya*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 56–66.
5. Vyrk, A.Kh. Upravlenie nagrevom zagotovok v metodicheskoy pechi [Control of heating of workpieces in a methodical furnace]. *Byulleten' TsNIChM*, 1970, no. 24, pp. 3–9.
6. Tkachenko, V.N. *Matematicheskoe modelirovanie, identifikatsiya i upravlenie tekhnologicheskimi protsessami teplovoy obrabotki materialov. T. 13* [Mathematical modeling, identification and control of technological processes of thermal processing of materials. Vol. 13]. Kiev: Naukova dumka, 2008. 244 p.
7. Gusovskiy, V.L., Lifshits, A.E. *Metodiki rascheta nagrevatel'nykh i termicheskikh pechey* [Methods for calculating heating and thermal furnaces]. Moscow: Teplotekhnika, 2004. 400 p.
8. Andreev, S.M., Parsunkin, B.N. Eksperimental'noe issledovanie effektivnosti energoberegayushchikh optimal'nykh rezhimov nagreva metalla [Experimental study of the efficiency of energy-saving optimal metal heating modes]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva*, 2014, no. 6, pp. 134–143.
9. Kurnosov, V.V., Levitskiy, I.A. Matematicheskoe modelirovanie nagreva zagotovok s peremennymi teplofizicheskimi kharakteristikami i teplovogo rezhima, sootvetstvuyushchego zadannomu grafiku nagreva [Mathematical modeling of heating of workpieces with variable thermophysical characteristics and thermal regime corresponding to a given heating schedule]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya Metallurgiya*, 2015, vol. 55, no. 7, pp. 19–22.
10. Kazantsev, E.I. *Promyshlennyye pechi* [Industrial ovens]. Moscow: Metallurgiya, 1975. 368 p.
11. Biryukov, A.B., Turulina, Yu.O. Sovershenstvovanie raschetnogo metoda opredeleniya ratsional'nykh rezhimnykh parametrov prokhodnoy pechi s mekhanizirovannym podom, rabotayushchey v usloviyakh peremennoy proizvoditel'nosti [Improving the calculation method for determining rational operating parameters of a continuous furnace with a mechanized hearth operating under conditions of variable productivity]. *Vestnik Donetskogo natsional'nogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki*, 2022, no. 3, pp. 52–56.
12. Zobnin, B.F., Kazyayev, M.D., Kitaev, B.I., Lisienko, V.G., Telegin, A.S., Yaroshenko, Yu.G. *Teploekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechey* [Thermal engineering calculations of metallurgical furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1982. 358 p.

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

Разработка и исследование подхода к обработке сигналов цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения

Авторское резюме

Состояние вопроса. В развитии вторичных систем станций и подстанций, включающих релейную защиту, автоматику, управление, учет электроэнергии, в последнее время произошли качественные изменения, вызванные внедрением цифровых технологий. Внедрение цифровых технологий поддерживается программами инновационного развития, такими как, например, «Цифровая трансформация 2030». Суть внедрения цифровых технологий связана с применением цифровых каналов передачи данных по единым стандартам. Активно внедряются проекты цифровых подстанций с передачей цифровой информации на всех уровнях, начиная с первичного оборудования, включая передачу информации как от измерительных трансформаторов тока и напряжения, так и от коммутационных аппаратов. В настоящее время активно развиваются и начинают внедряться цифровые измерительные трансформаторы, в которых информация об измеренных токах и напряжениях представляется в цифровом коде. Новые подходы к измерениям первичных токов и напряжений и передаче информации ставят новые задачи и открывают перспективы усовершенствования методов обработки сигналов, применяемых для релейной защиты. В связи с этим актуальной задачей является разработка и исследование подходов к цифровой обработке сигналов цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Материалы и методы. Для решения задач, поставленных в рамках данного исследования, использованы аналитические и численные методы решения с применением программных продуктов MathCAD и языка программирования Python для генерации сигналов и вывода их на графики. В целях обоснования достоверности проведена верификация результатов, полученных разными методами.

Результаты. Сформулирован подход к цифровой обработке сигналов, полученных с помощью датчиков тока цифрового измерительного трансформатора. Проведено исследование подхода определения синхронизированных значений вектора тока посредством обработки информации, полученной от первичных преобразователей тока. Осуществлен анализ характеристик алгоритма получения вектора и построены зависимости погрешностей от влияния искажающих факторов. Предложенный подход является развитием существующего подхода получения вектора за счет получения информации от датчиков тока, работающих на разных физических принципах. Показаны преимущества предложенного метода.

Выводы. Предложенный алгоритм цифровой обработки сигнала является более технически затратным, так как содержит как минимум два метрологически калиброванных измерительных канала вместо одного, однако позволяет при прочих равных условиях повысить точность и быстродействие алгоритмов цифровой обработки, взятых в качестве прототипа. Полученные результаты могут быть использованы для формирования алгоритмов измерительных органов релейной защиты.

Ключевые слова: цифровые измерительные трансформаторы тока, цифровая обработка сигналов, цифровая релейная защита, катушка Роговского, трансформатор тока, магнитотранзисторный датчик 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 Grigorev

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone 8(4932) 26-99-04, e-mail: denis.grigorev@mail.ru

Development and research of an approach to signal processing of digital instrument current and voltage transformers

Abstract

Background. During the development of secondary systems of stations and substations, including relay protection, automation, control, electricity metering, etc., qualitative changes have recently occurred due to the introduction of digital technologies. The introduction of digital technologies is supported by innovative development programs such as “Digital Transformation 2030”. The introduction of digital technologies is associated with the use of digital data transmission channels according to uniform standards. Projects of “digital substations” are being actively implemented with the transmission of digital information at all levels, including the primary equipment, the transmission of information both from current and voltage measuring transformers, and from switching devices. Currently, digital instrument transformers are actively being developed and implemented, in which information about measured currents and voltages is presented in digital code. New approaches to measure primary currents and voltages, and transmit information pose new challenges, and open prospects for improving signal processing methods used for relay protection purposes. Thus, the relevant aim of the study is the development and research of approaches to digital processing of signals of digital instrument current and voltage transformers.

Materials and methods. To solve the problems posed within the framework of this study, analytical and numerical solution methods have been used. Numerical methods are applied using software products such as MathCAD and the Python programming language to generate signals and display them on graphs. To substantiate the reliability, verification of the results obtained by different methods is carried out.

Results. The authors have formulated an approach to digital processing of signals obtained using current sensors of a digital instrument transformer. The authors have studied the approach to determine synchronized current vector values by processing information received from primary current converters. The characteristics of the algorithm for obtaining a vector have been analyzed and the dependences of errors on the influence of distorting factors have been plotted. The proposed approach is a development of the existing approach to obtain a vector by getting information from current sensors operating on different physical principles. The results show the advantages of the proposed method.

Conclusions. The proposed digital signal processing algorithm is more technically expensive since it contains at least two metrologically calibrated measuring channels instead of one. However, all other things being equal, it allows to increase the accuracy and speed of the digital processing algorithms taken as a prototype. The results obtained can be used to formulate algorithms for measuring relay protection devices.

Key words: digital measuring current transformers, digital signal processing, digital relay protection, Rogowski coil, current transformer, magnetotransistor current sensor

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.032-048

Введение. Рост потребления электроэнергии – это неотъемлемая составляющая развития экономики¹. Особенно быстрое развитие энергетики происходит в мегаполисах, где увеличение сложности систем и потребления электроэнергии приводит к увеличению токов КЗ. Например, средний прогнозируемый рост потребления электроэнергии в Москве составляет 1,76 % в год, а по присоединенным к Москве территориям – 8,6 %².

Рост потребления электроэнергии приводит к увеличению сложности и взаимосвязанности энергосистем, поэтому в целях предотвращения нестабильности системы и повреждения оборудования современные схемы защиты должны быть разработаны для устранения неисправностей в пределах долей циклов основной частоты. Для этого в алгоритмах, разрабатываемых для устройств релейной защиты, предлагаются алгоритмы расчета вектора за время, меньшее, чем период промышленной частоты [1–7]. Важно отметить, что чем короче алгоритм расчета вектора основной частоты, тем сложнее добиться снижения влияния искажающих сигнал факторов, таких как высшие гармоники, апериодические составляющие токов при переходных процессах и насыщение как измерительных трансформаторов тока (ТТ), так и силового оборудования [1–3]. Следует так же заметить, что время отключения выключателя много больше времени срабатывания защиты (>60 мс), поэтому эффект от ускорения защиты может быть незаметен на общем фоне. Тем не менее разница между общим временем срабатывания в 60 и 80 мс довольно значительна, что оправдывает поиски новых методов ускорения срабатывания защит.

Внедрение протокола МЭК 61850 и развитие цифровых подстанций с цифровыми измерительными трансформаторами позволяет разрабатывать новые, более совершенные алгоритмы РЗА [8, 9].

Источником сигнала для релейной защиты в рамках реализации цифровой подстанции с применением стандарта МЭК 61850 могут выступать электронные трансформаторы тока и напряжения, применяемые вместо трансформаторов, построенных на электромагнитном принципе и имеющих погрешности, обусловленные насыщением магнитопровода сердечника [10].

Повышение точности алгоритмов релейной защиты и учета электроэнергии стало возможным благодаря изобретению инновационных цифровых преобразователей тока и напряжения [11–18], обладающих такими преимуществами, как высокая точность измерения (погрешность по току и напряжению $\leq 0,1\%$), широкий частотный диапазон измерения (включая измерение постоянного тока), отсутствие насыщения, вызванного током короткого замыкания и апериодической составляющей.

В Ивановском государственном энергетическом университете совместно с НПО «Цифровые измерительные трансформаторы» разработаны преобразователи тока и напряжения с использованием таких нетрадиционных датчиков, как магнитотранзисторный преобразователь, катушка Роговского (КР) для измерения тока и делитель для измерения напряжения [11–14].

Структура цифрового трансформатора [15] упрощенно представлена на рис. 1. Датчиковая система цифрового измерительного трансформатора (ЦИТ) состоит из трех сенсоров тока – классического трансформатора тока, катушки Роговского, которая измеряет не непосредственное значение тока, а его производную, и магнитотранзисторного датчика, который измеряет непосредственное значение тока, но при этом не имеет эффекта насыщения.

Относительно новыми измерительными преобразователями являются датчики тока на магнитотранзисторах и катушка Роговского.

¹ Государственный доклад. О состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации в 2021 году. (URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/5a79eed92247fc7cb91873a107625372/Energy_efficiency_2022.pdf).

² Схема электроснабжения города Москвы (распределительные сети напряжением 6–10–20 кВ) на период до 2030 года с учетом присоединенных территорий. (URL: <https://www.mos.ru/dgkh/documents/skemy/view/41902220>).

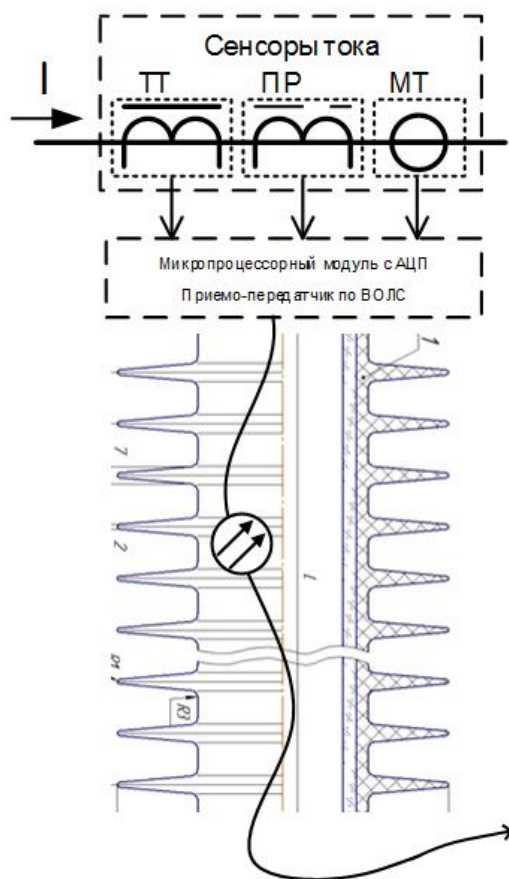


Рис. 1. Структура измерительной части цифрового трансформатора тока

Также следует отметить, что в [16–23] описано применение катушек Роговского в релейной защите в сетях низкого, среднего и высокого напряжения. В этом случае их используют для организации дифференциальной защиты таких объектов, как шины, воздушные и кабельные линии, генераторы, трансформаторы и т.п.

Однако существуют особенности катушек Роговского, которые следует учитывать при эксплуатации, например влияние смещения токопровода [24] или температуры на погрешность.

Комбинация из трех измеренных мгновенных значений тока [25] открывает доступ к разработке более прогрессивных алгоритмов РЗА, отличающихся от алгоритмов, основанных на измерениях только одного датчика.

Задача быстрого и точного вычисления амплитуды и фазы сигнала имеет приоритет для релейной защиты, так как отключение поврежденного объекта должно происходить за наикратчайший промежуток времени. Для решения этой задачи было

разработано множество алгоритмов, работающих на разных принципах.

Классически на цифровой измерительный орган поступает информация только от одного датчика тока (трансформатора тока или катушки Роговского). В рамках нашего исследования предложено использовать несколько датчиков тока, выполненных на разных физических принципах.

Анализ возможности применения нескольких датчиков представлен на основе векторного преобразования дискретизированных сигналов, являющегося основным, но не единственным способом обработки сигналов в релейной защите. В качестве прототипов предлагаемого алгоритма используются алгоритмы получения векторов на основе мгновенных значений и их производных [1].

Методы исследования. Основными методами вычисления значений амплитуды и угла тока в микропроцессорных устройствах на данный момент являются модификации преобразования Фурье, которые гарантируют вычисление параметров сигнала за 10–20 мс. Для достижения меньшего времени срабатывания защиты необходимо обратить внимание на алгоритмы, работающие с отдельными выборками. В теории цифровой обработки сигнала существует решение по получению векторов измеряемых величин на основе формул, с помощью которых амплитуда и фаза синусоидального сигнала могут быть вычислены по мгновенным значениям величин и их производных [1]:

$$U = \sqrt{u^2(t) + \left(\frac{1}{\omega} \frac{\partial u}{\partial t}\right)^2};$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\omega \cdot u(t)}{\partial u / \partial t}\right) - \omega t.$$
(1)

Вектор сигнала, в соответствии с формулами (1), может быть записан в следующем виде:

$$\vec{U}(t) = U e^{j\omega t} = \frac{1}{\omega} \frac{\partial u}{\partial t} + j \cdot u(t).$$
(2)

Непрерывный сигнал $u(t)$ в микропроцессорных устройствах после аналого-цифрового преобразования описывается последовательностью дискретных значений, которые называются отсчетами или выборками (рис. 2).

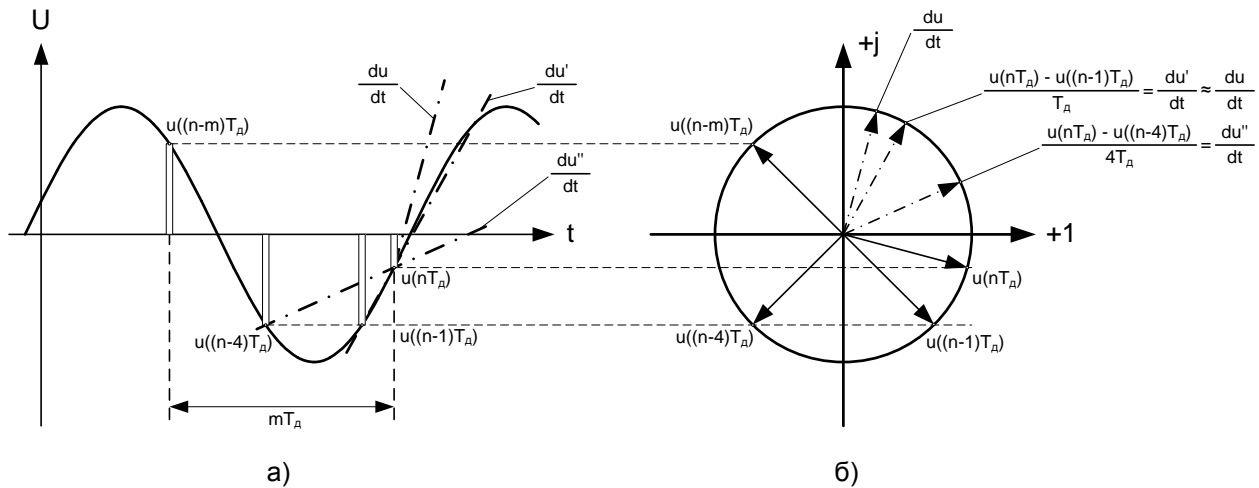


Рис. 2. Представление дискретизации сигнала: а – во времени; б – на комплексной плоскости

Текущее дискретное значение сигнала и приближенное значение его производной в (1) могут быть определены по формулам:

$$u(t) = u(n);$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} \approx \frac{1}{T_d} [u(n) - u(n-1)], \quad (3)$$

где T_d – период дискретизации; $u(n)$ – текущая выборка сигнала; $u(n-1)$ – предыдущая выборка сигнала.

Частота дискретизации выборок крайне важна для расчета производной по формулам (3). Близкие выборки дают более точный результат, в то время как удаленные друг от друга выборки дают большую погрешность (рис. 2). Простейшим алгоритмом вычисления вектора синусоидального сигнала по мгновенным значениям является алгоритм определения вектора по двум выборкам. Суть алгоритма на основании формул (1)–(3) определяется выражением

$$\underline{U}(nT_d) = \left(\frac{N}{2\pi} + j \right) u(nT_d) - \frac{N}{2\pi} u((n-1)T_d). \quad (4)$$

Выражение (4) дает погрешность, связанную с тем, что мгновенный отсчет осуществляется в момент времени nT_d , а производная вычисляется для момента времени, отстающего от nT_d на $T_d/2$.

В [1] предлагается снижение погрешности за счет усреднения замеров или применения метода двух выборок с решением системы уравнений с использованием функции синуса, что приводит к уменьшению погрешности, но к увеличе-

нию сложности вычислительного процесса, что, в свою очередь, увеличивает требования к вычислительной мощности микропроцессора.

Наличие в ЦИТ датчиков, реализованных на разных физических принципах, позволяет получить простой алгоритм для вычисления значения амплитуды и угла вектора. Для этого будем использовать датчик, осуществляющий линейное преобразование сигнала, а также катушку Роговского, которая выдает сигнал, пропорциональный производной входного тока. В соответствии с (1), (2) нормируем сигнал КР, умножая выходной сигнал на коэффициент, пропорциональный $1/\omega$, получая одну из двух ортогональных компонент, представленных на рис. 3. Другую компоненту получим с датчика, осуществляющего прямо пропорциональное преобразование, например с магнитотранзисторного датчика тока. Таким образом, взяв одновременно всего по одной выборке с каждого датчика, мы получаем точное значение вектора (рис. 3).

Следует отметить, что точное значение вектора (без методической погрешности) будет вычисляться только для идеального синусоидального сигнала неизменной частоты.

Результаты исследования. Выполним проверку работы алгоритма при воздействии искажающих факторов: высших гармоник, апериодической составляющей, отклонения частоты. Будем считать, что катушка Роговского откалибрована для работы на частоте 50 Гц.

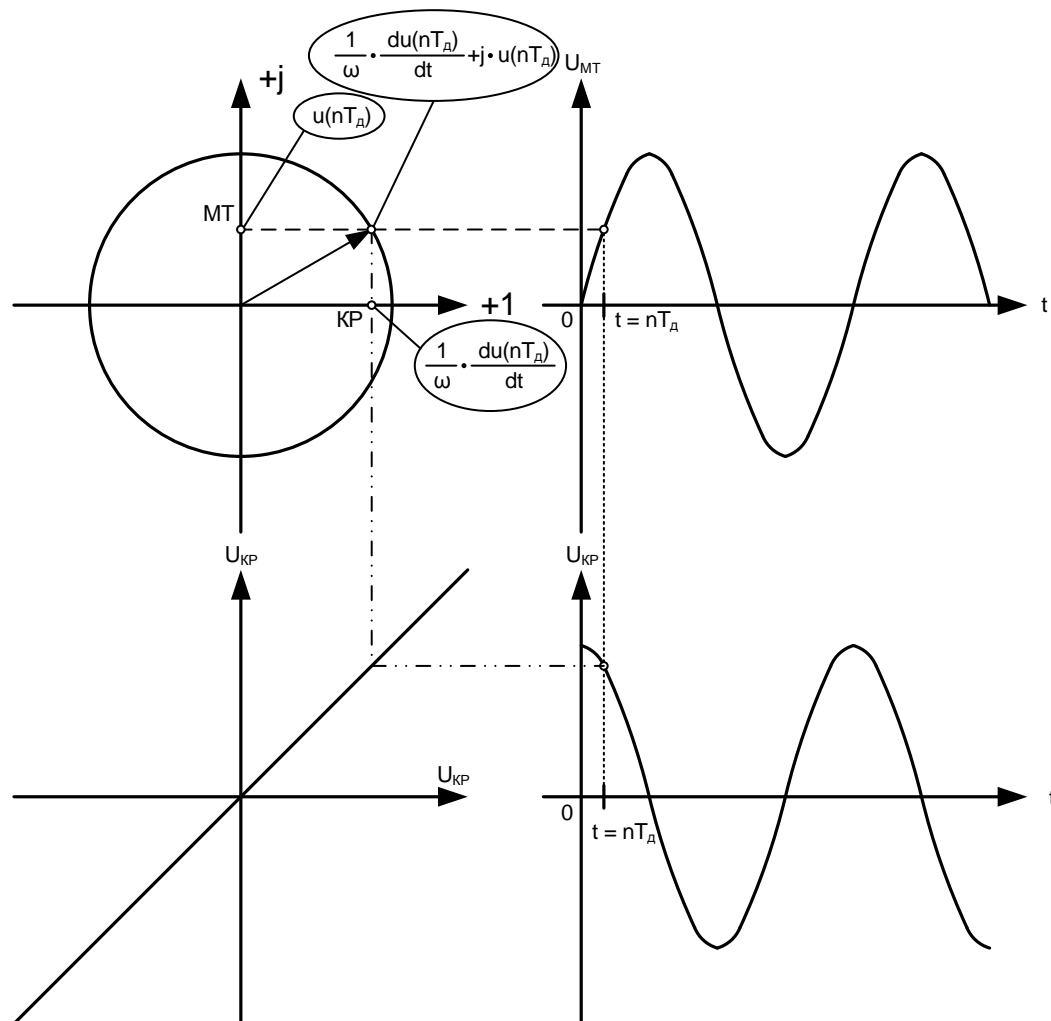


Рис. 3. Измеренные магнитотранзисторным (МТ) датчиком и катушкой Роговского сигналы, формирующие ортогональные компоненты измеряемой величины

Анализ влияния изменения частоты на работу алгоритма. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазо-частотная характеристика (ФЧХ) датчика на катушке Роговского показаны на рис. 4. При увеличении частоты выходной сигнал катушки Роговского линейно возрастает в соответствии с АЧХ датчика (рис. 4,а), а фазовый сдвиг остается неизменным, равным 90° (рис. 4,б). Амплитуду и фазу другого датчика будем считать не зависящими от частоты измеряемого сигнала.

В [1] уже описаны частотные свойства алгоритма вычисления вектора по двум точкам (см. уравнение (4)), в частности показано сходство и различие алгоритма с цифровыми фильтрами. При изменении частоты в обе стороны от номинального значения область вращения вектора превращается в эллипс с двумя диаметрами: A_1 – при изменении в большую сторону, A_2 – при изменении в меньшую сторону.

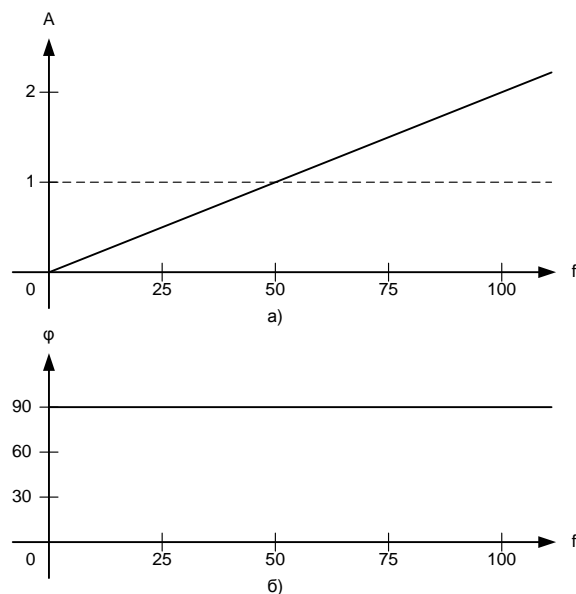


Рис. 4. АЧХ (а) и ФЧХ (б) датчика на катушке Роговского

На рис. 5 указаны зависимости диаметров эллипса от числа выборок (рис. 5,а) и от частоты (рис. 5,б). Их анализ показывает, что увеличение числа выборок положительно влияет на сходимость диаметров к единице, однако даже при 32 выборках на период значения диаметров имеют отклонения в $\pm 5\%$ (рис. 5,а, 1 – отклонения в большую сторону, 2 – отклонения в меньшую сторону). В то же время алгоритм, основанный на двух измерительных датчиках и одной выборке ($1'$ и $2'$), не имеет погрешностей, связанных с количеством выборок, по своему принципу действия. Анализ зависимостей (рис. 5,б) показывает, что увеличение числа выборок усиливает дифференцирующие свойства алгоритма двух выборок. Для алгоритма одной выборки зависимость A_1 от частоты будет совпадать с линией $N = \infty$ при любом значении N , поскольку в алгоритме одной выборки используется дифференцирующее звено в виде КР.

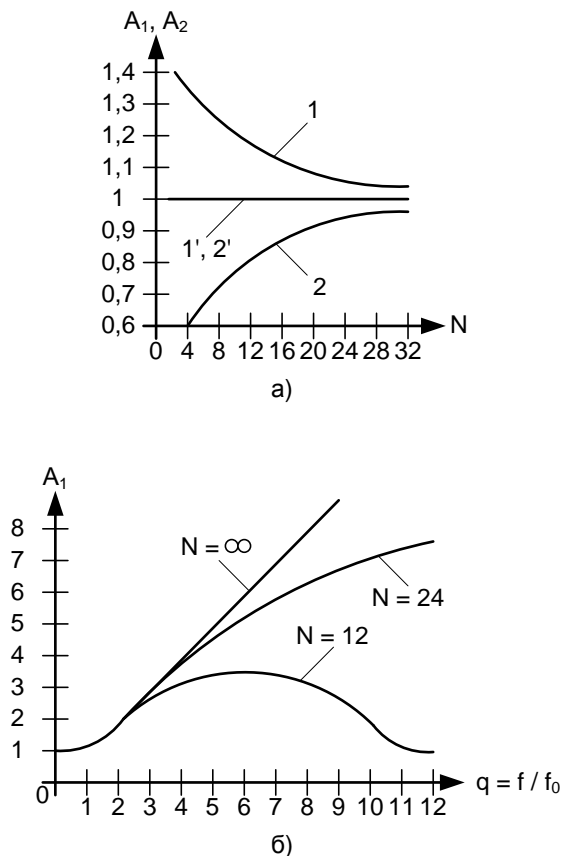


Рис. 5. Зависимости диаметров эллипса, характеризующего частотные свойства [1]: а – от числа выборок; б – от частоты

Благодаря частотной зависимости катушки Роговского при вычислении вектора будет наблюдаться увеличение или уменьшение его действительной составляющей,

поэтому относительная амплитуда вектора будет равна единице при переходе сигнала с КР через 0 и соотношению частоты к частоте 50 Гц при переходе сигнала с МТ датчика через 0. Фаза будет совершать движения вокруг нуля с равными отклонениями в отрицательной и положительной области. Результирующие АЧХ и ФЧХ изображены на рис. 6, где дополнительно указана область допустимых значений отклонения частоты $\pm 0,4$ Гц³ от номинальной в нормальных режимах. Также указана зона действия нижнего уровня уставок автоматической частотной разгрузки (АЧР1) и автоматического устройства ступенчатого отключения по факту повышения частоты [26]. Анализ зависимостей (рис. 6) показывает, что при максимально допустимом отклонении частоты $\pm 0,4$ Гц в нормальном режиме погрешность по амплитуде не превышает 1 %, а угловая погрешность – 15 минут, в области действия частотной автоматики $\pm 3,5$ Гц погрешность по амплитуде не превышает 1,07 %, а угловая погрешность – 35 минут.

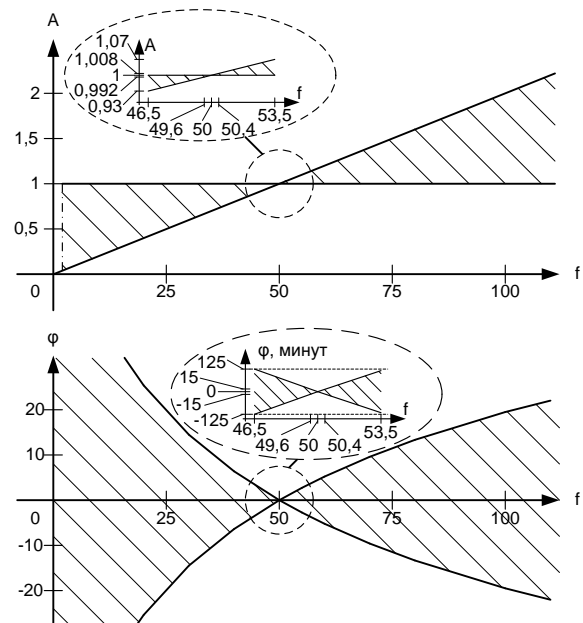


Рис. 6. АЧХ и ФЧХ при отклонении частоты

Продемонстрируем поведение сигнала при изменении частоты (рис. 7). График на рис. 7,а изображает сигнал с МТ датчика, на рис. 7,б – сигнал с КР, амплитуда которого растет с ростом частоты.

³ ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

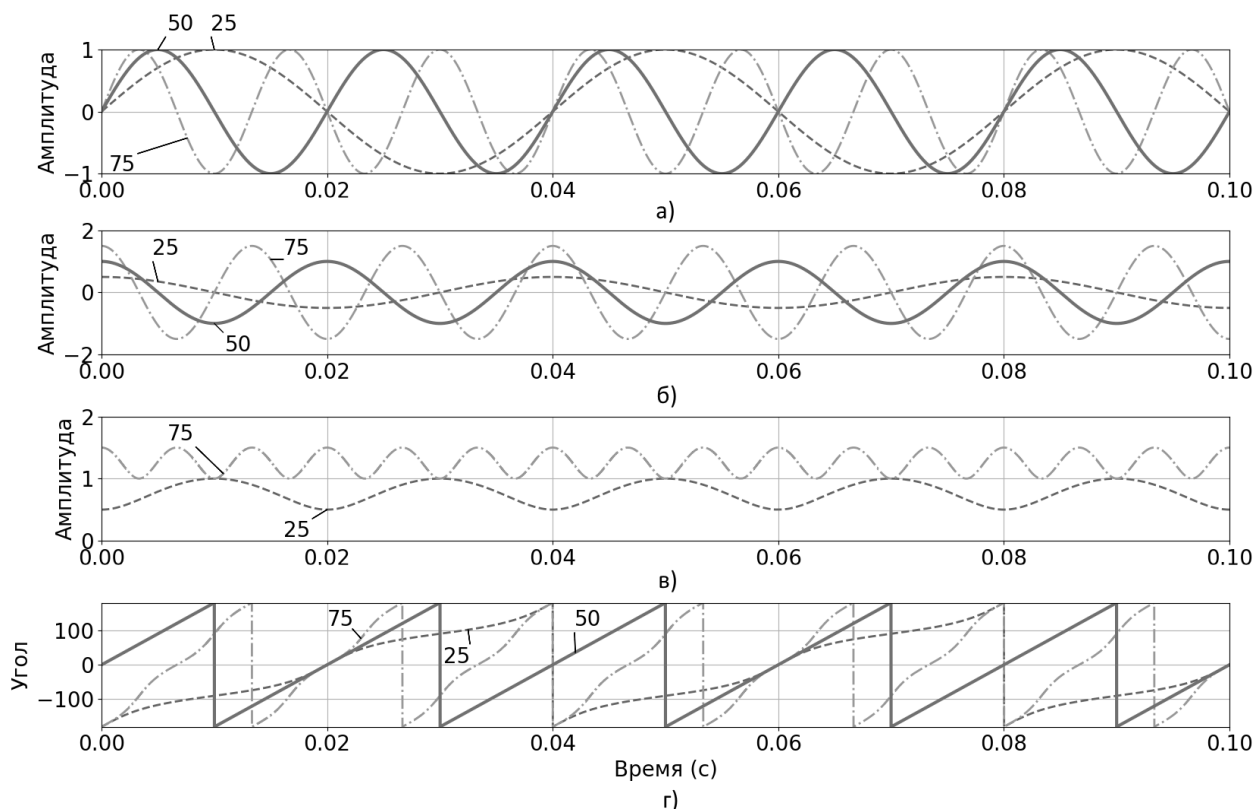


Рис. 7. Сигналы с МТ датчика (а), с КР (б), вычисленная амплитуда вектора (в) и абсолютное значение угла (г) при частотах $f = 25$ Гц, $f = 50$ Гц, $f = 75$ Гц

На рис. 7,в показан общий для двух годографов график – график амплитуды, рассчитанной по одной выборке. График на рис. 7,г показывает абсолютный угол, вычисленный как соотношение синусной и косинусной составляющих (сигналов с МТ датчика и КР) без привязки к опорному вектору. Можно заметить, что график угла для 50 Гц имеет монотонный рост. Это связано с тем, что амплитуды синусной и косинусной составляющих равны. Расхождение значений амплитуд формирует области ускоренного и замедленного движения угла.

Дадим объяснение поведению углов (рис. 7) используя годографы эллипса и круга (рис. 8, где показана половина эллипса и опорная окружность, по которым происходит вращение векторов). Траектории движения соотношены путем разметки точек на обеих фигурах через равные промежутки времени и объединения одновременно измеренных точек с разных фигур штрихпунктирной линией. В нулевой момент времени (при пересечении оси X) абсолютные углы, равные арктангенсу соотношения компоненты оси Y к компоненте оси X, будут равны нулю. Дальнейшее увеличение времени вызывает движение векторов. Первые 5–10 точек на окружности геометрически

располагаются крайне близко друг к другу, в то время как соотношение $\Delta y/\Delta x$ в соответствующих точках на эллипсе значительно изменяется, приводя к опережению абсолютного угла эллипса относительно абсолютного угла окружности. При приближении к оси Y значение арктангенса обоих векторов стремится к 90 градусам, таким образом вектора сокращают значение относительного угла. Данный колебательный характер относительного угла проявляется во всех точках траектории движения векторов, кроме 0, 90, 180 и 270 градусов по годографу, где значение становится равным нулю. Между этими градусами дважды за период относительный угол получает максимальное и минимальное значение, прямо пропорциональное зависящее от величины большего радиуса эллипса.

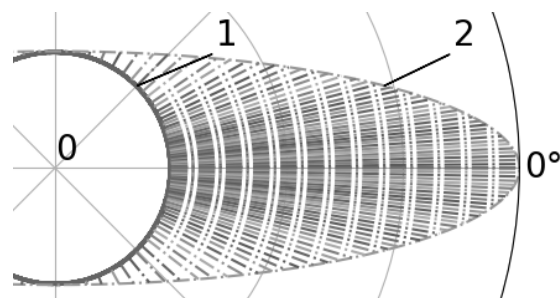


Рис. 8. Годографы эллипса (2) и круга (1)

При повороте эллипса на годографе в ту или иную сторону вышеописанные закономерности сохраняются со следующей особенностью: относительный угол становится равен нулю при пересечении вектором большего или меньшего радиуса эллипса.

Построенная на рис. 6 ФЧХ соответствует случаю, когда полученный вектор сравнивается с опорным вектором той же частоты, имеющим единичную амплитуду при любом угле и плавное движение абсолютного угла (по характеру совпадает с графиком угла 50 Гц на рис. 7, но отличается частотой). Опорный вектор здесь не нужен для устранения вращательной компоненты ωt вектора. Полученный по алгоритму одной выборки вектор будет иметь эллипсоидную форму траектории при движении абсолютного угла вектора. Это приводит к небольшой колебательности относительного угла – до ± 20 градусов на 100 Гц (см. рис. 6). Изобразим годограф для данного случая (рис. 9, а). Можно заметить, что отклонения частоты в этом случае приводят к появлению на годографе окружностей, проходящих через точку (1; 0) дважды за период.

Рассмотрим другой случай: используем глобальную синхронизацию с точным временем, за опорный вектор берем идеальный единичный вектор с неизменной частотой 50 Гц (например, полученный с помощью точного кварцевого генератора и синхроимпульсов GPS). Тогда годограф примет вид, показанный на рис. 9, б, где относительный угол для каждой частоты меняется в широком диапазоне – от -180 до 180 градусов. Это вызывает полный поворот вектора по годографу за определенное время, равное периоду разности частот опорного вектора и вычисленного по алгоритму.

Примем, что опорный вектор имеет ту же частоту, что и частота вычисленного вектора. В соответствии с нормативной документацией на измерительные ТТ⁴, для класса 10Р и нормального режима работы амплитудная погрешность попадает в необходимый диапазон с более чем десятикратным запасом (изменение амплитуды до $\pm 0,8\%$), а угловая не нормируется, но попадает в диапазон для более точных

классов 1, 0,5 и 0,5S, к которым предъявляются более строгие требования (изменение угла менее ± 15 минут); при аварийном снижении или повышении частоты амплитудная погрешность попадает в пределы класса точности с хорошим запасом (максимальное изменение амплитуды $\pm 7\%$), а угловая погрешность не попадает в диапазоны указанных выше классов (максимальное изменение угла $\pm 124\text{--}125$ минут).

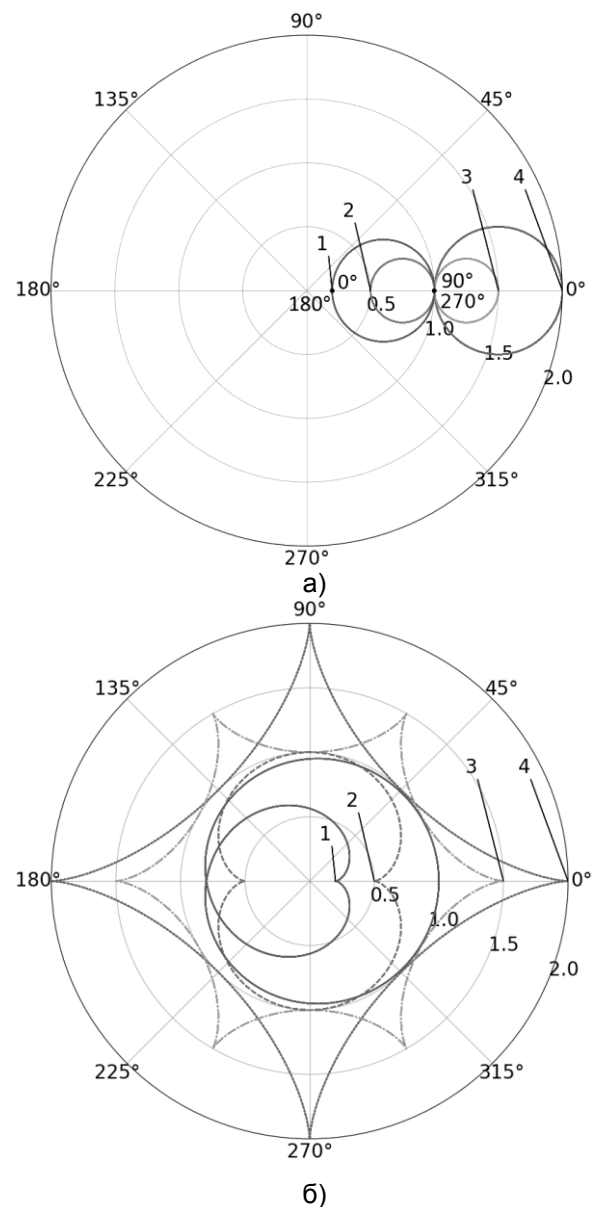


Рис. 9. Годографы для случая идеального опорного вектора с совпадающей (а) и неизменной (б) частотой при частоте сигнала $f = 10$ Гц (1), $f = 25$ Гц (2), $f = 75$ Гц (3), $f = 100$ Гц (4)

Рассмотрим возможность снижения погрешности вплоть до полного ее устранения путем введения корректирующего коэффициента в сигнал, получаемый с КР.

⁴ ГОСТ 7746-2015. Трансформаторы тока. Общие технические условия.

Выше было отмечено, что сигнал, получаемый с КР, зависит от частоты, а отклонения частоты приводят к эллипсоидному движению вектора. Дважды за период сигнал с КР проходит свое минимальное и максимальное значения, как и сигнал с другого датчика. Следовательно, взяв выборки сигнала за полпериода, мы можем найти амплитуду как сигнала с КР, так и сигнала с МТ датчика. Их соотношение дает нам соотношение частоты в сети к частоте, на которой была откалибрована КР. Умножив сигнал с КР на величину, обратную соотношению частот, мы обновим калибровку КР до актуального значения частоты. Вышеописанное представляется следующей формулой:

$$U_{\text{КР}} = k_f k_{\text{КР}} U_{\text{КР}}, \quad (5)$$

где $U_{\text{КР}}$ – напряжение на КР; $k_{\text{КР}}$ – калибровочный коэффициент КР; k_f – корректировочный коэффициент по частоте, равный соотношению максимумов сигналов МТ и КР (без учета корректировки).

После получения k_f корректируем $U_{\text{КР}}$ по формуле (5), получая нормированное значение напряжения для установившейся в сети частоты. При отклонении частоты сети процесс корректировки повторяется.

Анализ влияния апериодической составляющей на измерение амплитуды и фазы. Выполним моделирование пере-

ходного процесса в простейшей цепи (рис. 10). Сам переходный процесс описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} I(t) = I_{\text{устДоКЗ}}(t) \text{ при } t < t_{\text{КЗ}}, \\ I(t) = I_{\text{устКЗ}}(t) + A \cdot e^{-\frac{(t-t_{\text{КЗ}})}{\tau}}, \\ A = I_{\text{устДоКЗ}}(t_{\text{КЗ}}) - I_{\text{устКЗ}}(t_{\text{КЗ}}), \end{cases} \quad (6)$$

где $I_{\text{устДоКЗ}}$ – установившаяся составляющая тока до КЗ; $I_{\text{устКЗ}}$ – установившаяся составляющая тока КЗ; $t_{\text{КЗ}}$ – время возникновения КЗ; A – амплитуда апериодической составляющей; τ – постоянная времени.

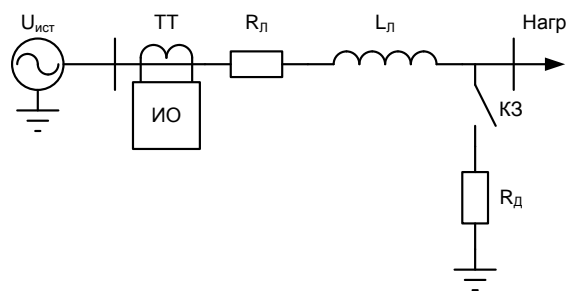


Рис. 10. Модель сети с апериодической составляющей

Примем постоянную времени затухания $\tau = 0,06$ с и амплитуду как 25, 50, 75 и 100 % от амплитуды сигналов, представленных на рис. 11.

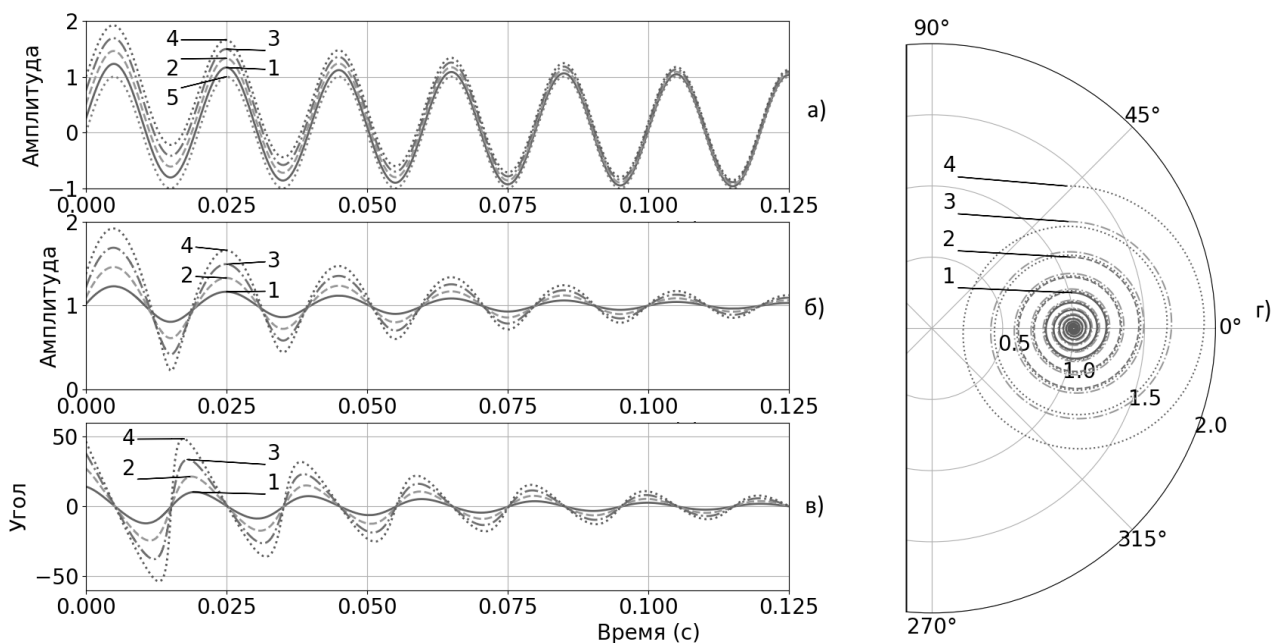


Рис. 11. Исходные сигналы (а), замеры амплитуды (б) и фазы (в) вектора, его годограф (г) при $A = 0,25$ (1), $A = 0,5$ (2), $A = 0,75$ (3) и $A = 1$ (4) и $A = 0$ (5)

На рис. 11,а изображены сами входные сигналы, на рис. 11,б представлен результат расчета амплитуды, вычисленной предложенным способом определения вектора по мгновенному значению, на рис. 11,в изображено расчетное значение угла. Можно наблюдать увеличение отклонения амплитуды и угла от установившегося состояния с ростом амплитуды аperiodической составляющей. С ростом амплитуды аperiodической составляющей точки экстремума угла смещаются влево в положительной полуwave и вправо в отрицательной полуwave, ускоряя процесс перехода от отрицательного к положительному экстремуму. На комплексной плоскости данный результат имеет вид ниспадающей спирали, стремящейся к установившемуся состоянию (точка с амплитудой 1 на оси X (рис. 11,г)).

Можно заметить, что спираль годографа делает один оборот вокруг центра вращения за период основной частоты, отличаясь от предыдущего значения на величину, пропорциональную постоянной времени. Приближенное значение центра спирали (установившейся составляющей) можно установить путем комплексной (векторной) полусуммы точек, отстоящих друг от друга на время половины периода основной частоты (0,01 с). Полученный вектор будет располагаться около точки установившегося значения, обладая при этом небольшой погрешностью, равной половине разности значений аperiodической составляющей в моменты взятия исходных векторов. Таким образом, при медленном

протекании переходного процесса мы можем получить достоверное значение вектора без существенного влияния аperiodической составляющей.

Анализ влияния высших гармонических составляющих на измерение амплитуды и фазы. Примем наличие третьей гармоники и изменим ее амплитуду так, чтобы она составляла 10, 20, 30 и 40 % от амплитуды исходного сигнала (рис. 12). Наличие синфазной третьей гармоники приводит к несимметричным искажениям замера амплитуды относительно оси X и к симметричным искажениям замера угла. С увеличением амплитуды гармоники экстремумы амплитуды и угла замера также увеличиваются по оси Y, не смещаясь по оси времени. В комплексной плоскости это проявляется как увеличивающийся с ростом амплитуды третьей гармоники треугольник с центром в точке (1; 0) и гранями, имеющими изгиб к центру.

Моделирование изменения фазного угла третьей гармоники от 0 до 90 градусов с шагом 30 при амплитуде 40 % представлено на рис. 13. Изменение угла гармоники при неизменной амплитуде приводит к комплексному изменению замера: смещению локальных пиков, изменению их величины. Однако на комплексной плоскости все сводится к вращению треугольника против часовой стрелки относительно своего центра. Примем наличие различных гармоник от 2 до 5 при амплитуде 10 % от основной (рис. 14).

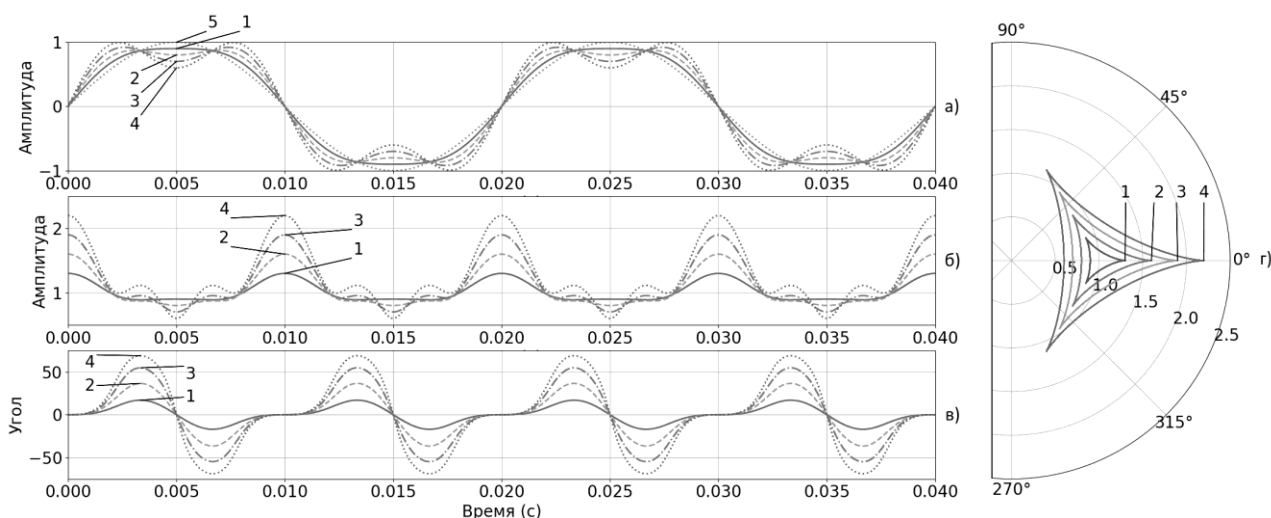


Рис. 12. Исходные сигналы (а), замеры амплитуды (б) и фазы (в) вектора, его годограф (г) при $A = 0,1$ (1), $A = 0,2$ (2), $A = 0,3$ (3) и $A = 0,4$ (4) и отсутствии гармоники (5)

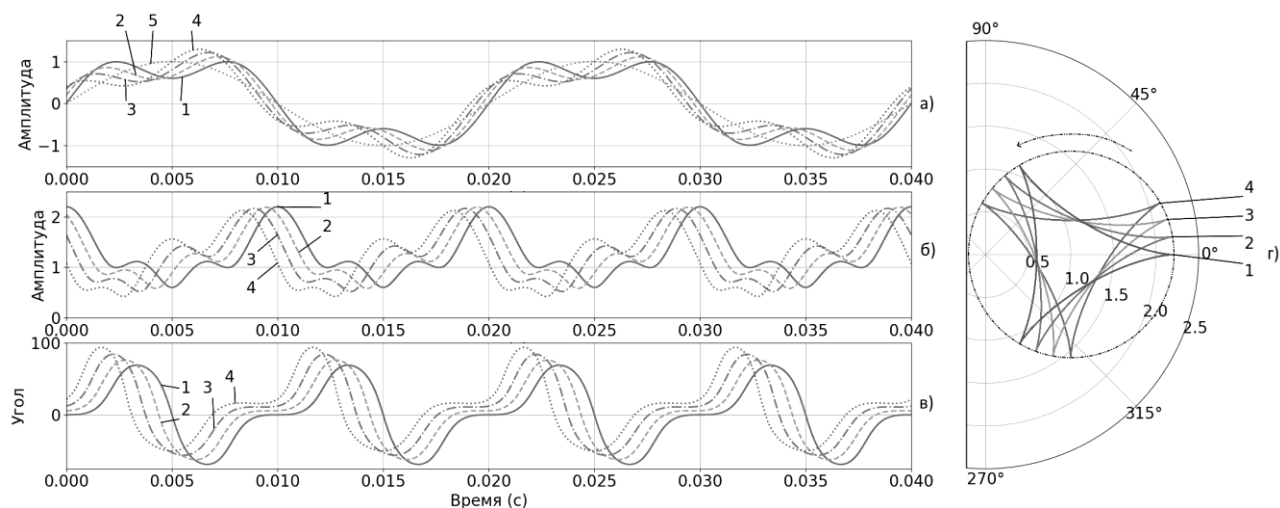


Рис. 13. Исходные сигналы (а), замеры амплитуды (б) и фазы (в) вектора, его годограф (г) при углах 0 (1), 30 (2), 60 (3), 90 (4) и отсутствии гармоник (5)

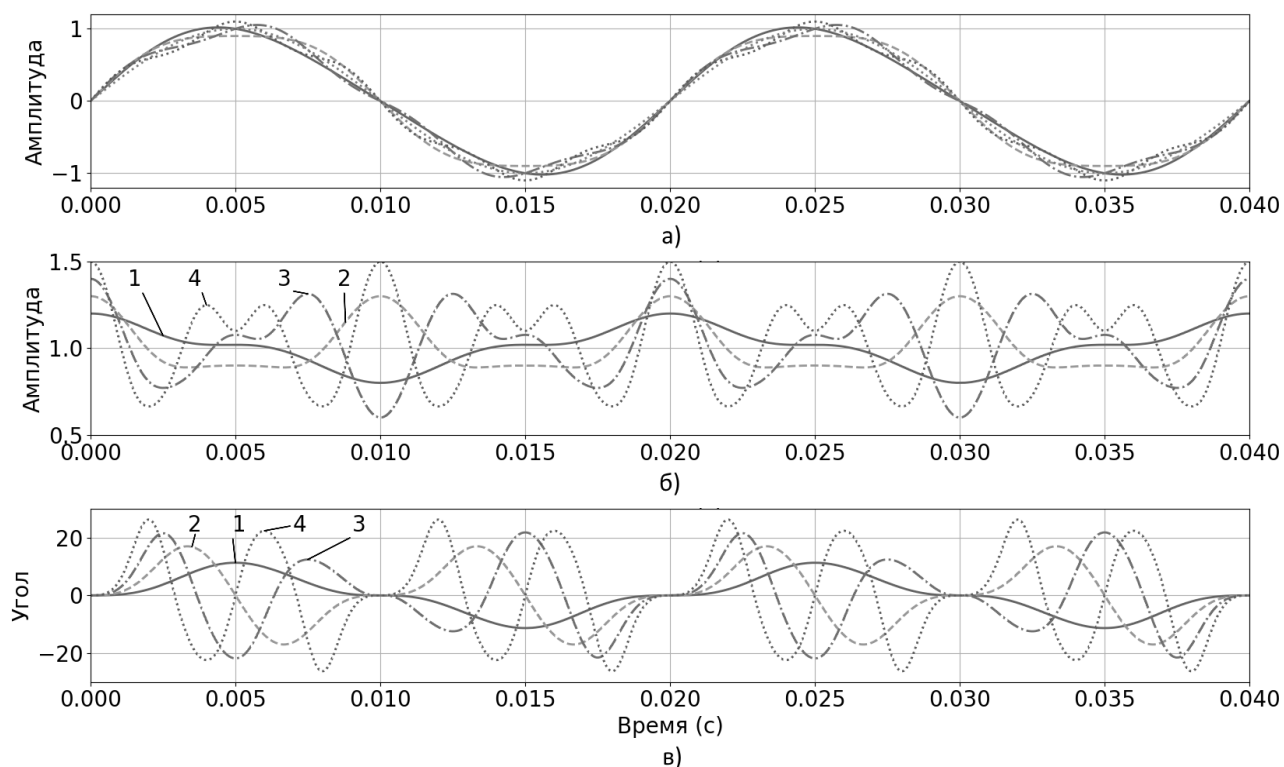


Рис. 14. Исходные сигналы (а), замеры амплитуды (б) и фазы (в) вектора при гармониках $N = 2$ (1), $N = 3$ (2), $N = 4$ (3), $N = 5$ (4)

Наличие в сигнале кратных гармоник также приводит к трудноанализируемым обычным образом изменениям замеров амплитуды и угла, однако в комплексной плоскости полученные результаты вырождаются в гипоциклоиды с числом каспов (пиков) $2N$ для четных гармоник и N для нечетных (рис. 15).

Анализ влияния скачкообразного изменения тока. Рассмотрим разницу в работе двух алгоритмов в момент возникновения короткого замыкания: по одной выборке с использованием двух датчиков и по двум выборкам с использованием одного датчика. Примем следующее: ток до КЗ – 1 о.е., ток после КЗ – 4 о.е., АЦП обрабатывает 12 выборок за период промышленной частоты (рис. 16).

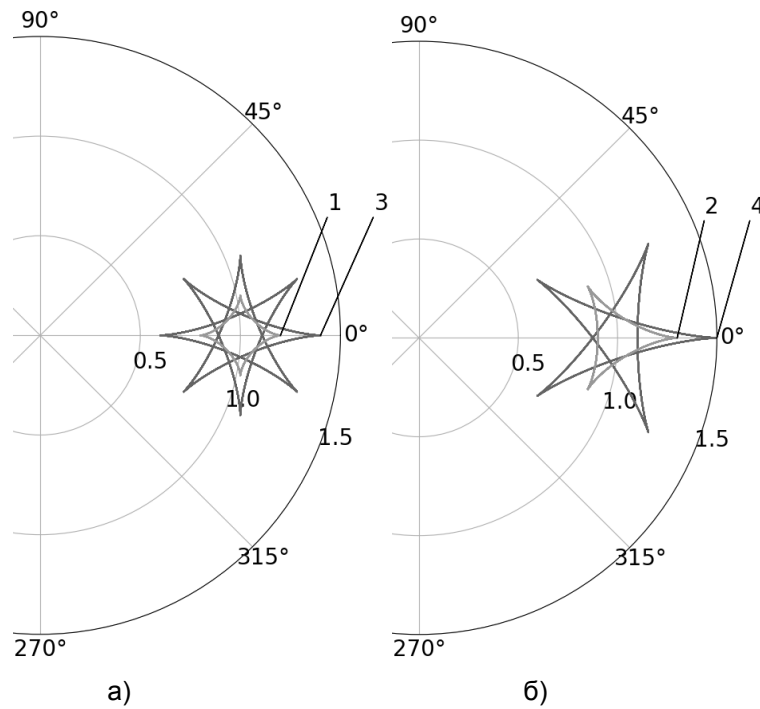


Рис. 15. Годограф вектора при гармонической составляющей $N = 2$ (1), $N = 3$ (2), $N = 4$ (3) и $N = 5$ (4): а – четные гармоники; б – нечетные гармоники

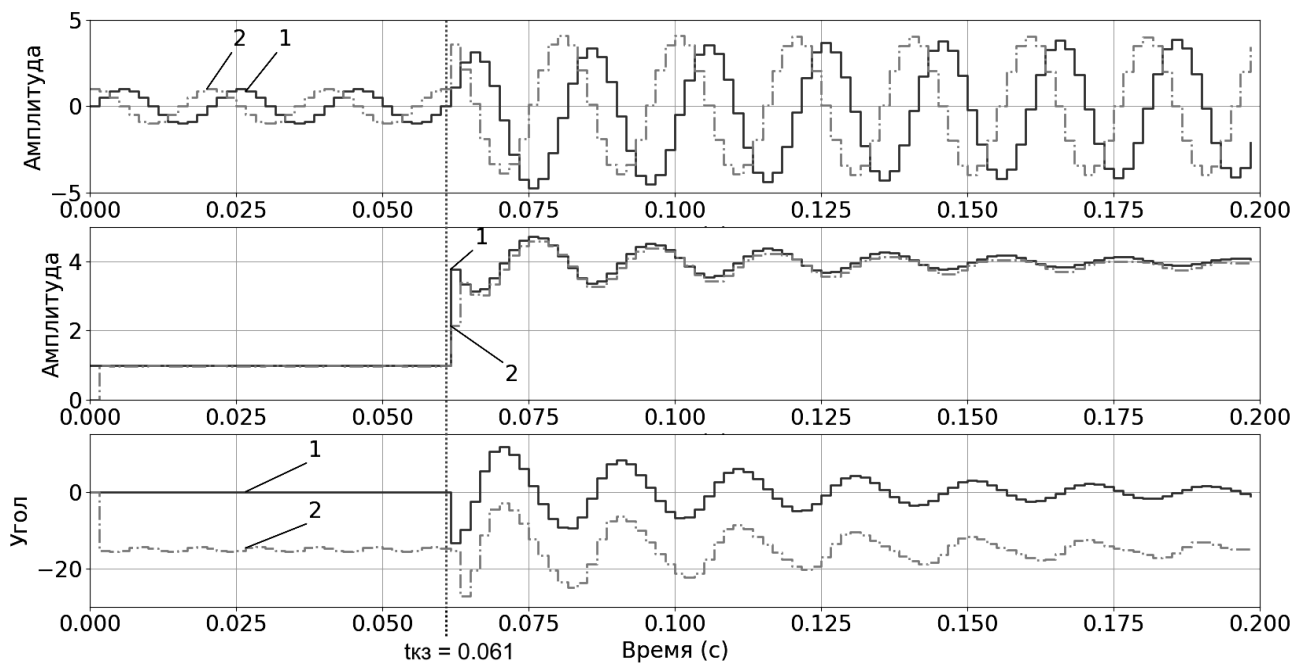


Рис. 16. Исходные сигналы с ТТ и КР (1 и 2 соответственно на верхнем графике) и замер амплитуды и фазы вектора двумя различными алгоритмами: по одной выборке (1) и по двум выборкам (2)

Анализ полученных результатов показывает, что алгоритм двух выборок обладает задержкой в переходных режимах, а также имеет постоянную угловую погрешность, равную половине разницы между углами соседних выборок (15 градусов для 12 выборок на период). Аперiodическая составляющая действует на алгоритмы схожим образом, поэтому угол и ампли-

туда вектора колеблются около одного установившегося состояния.

В момент КЗ происходит плавное изменение сигнала тока, но резкое изменение его производной. Алгоритм, основанный на измерении мгновенного значения одной точки, не испытывает никаких дополнительных погрешностей, связанных с этим явлением. Иначе ведет себя алго-

ритм, основанный на измерении двух точек: так как алгоритм использует усреднение двух точек замера, а КЗ произошло в момент перехода тока через 0, значение синусной компоненты оказалось в 2 раза меньше, чем оно есть в реальности. Вычисленное значение производной также оказалось неверным – 2 против реального 3,6. В итоге оказалось неверным определенное значение амплитуды вектора – 2,15 против 3,75 по алгоритму с одной выборкой. Погрешность составила 6,25 % для алгоритма с одной выборкой и 46,25 % для алгоритма с двумя выборками (или же 42,67 %, если принять значение 3,75 за идеальное и 2,15 за сравниваемое).

Выводы. Сравнение существующего метода получения вектора сигнала (тока) с предложенным способом получения вектора тока путем цифровой обработки сигналов, полученных с помощью датчиков цифрового измерительного трансформатора тока, показывает, что предложенный подход получения вектора является развитием существующего подхода за счет получения информации от датчиков тока, работающих на разных физических принципах, но при этом имеет ряд преимуществ.

Анализ характеристик алгоритма получения вектора и зависимостей погрешностей от влияния таких искажающих факторов, как изменение частоты, наличие апериодической составляющей, наличие высших гармоник, позволил предложить способы снижения влияния этих факторов. Устранение влияния высших гармоник в соответствии с теоремой Найквиста требует более сложных алгоритмов с числом замеров не менее двух на период частоты наибольшей гармоники.

Предложенный алгоритм цифровой обработки сигнала является более технически затратным, так как содержит как минимум два метрологически калиброванных измерительных канала вместо одного, однако позволяет при прочих равных условиях повысить точность и быстродействие алгоритмов цифровой обработки, взятых в качестве прототипа.

Показана возможность снижения влияния апериодической составляющей тока переходного процесса и устранения влияния изменения частоты сети на получаемый с помощью предложенного алгоритма вектор. Полученные результаты могут быть использованы для формирования

алгоритмов измерительных органов релейной защиты.

Вопросы метрологии и поверки системы с двумя датчиками тока, реализованными на разных физических принципах, должны стать объектом дальнейшего исследования.

Список литературы

1. **Шнеерсон Э.М.** Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
2. **Horowitz S.H., Phadke A.G.** Power systems relaying. – 3rd ed. – West Sussex, England: John Wiley & Sons Inc, Ltd, 2008.
3. **Honorato T.R., Silva K.M.** Half-Cycle DFT-Based Phasor Estimation Algorithm for Numerical Digital Relaying // 2018 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS). – Brasília, Brazil, 2018. – P. 1–4. DOI: 10.1109/WCNPS.2018.8604396.
4. **Phadke A.G., Thorp J.S.** Computer Relaying for Power Systems. – 2 ed. – JohnWiley & Sons Inc, West Sussex, UK, 2009.
5. **Chen Ching-Shan, Liu Chih-Wen, Jiang J.-A.** Application of combined adaptive Fourier filtering technique and fault detector to fast distance protection // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006, April. – Vol. 21, no. 2. – P. 619–626. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.858808.J
6. **Rosolowski E., Izykowski E., Kasztenny B.** New half-cycle adaptive phasor estimator immune to the decaying DC component for digital protective relaying // Proceedings of the 32nd Annual North American Power Symposium. – Waterloo, Canada, 2000.
7. **Revyakin V.A., Pletnev S.V., Klimova T.G.** Using the Fourier Transform of the Half-Cycle to Enhance the Application of the PMU // 2020 3rd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA). – M., 2020. – P. 1–14. DOI: 10.1109/RPA51116.2020.9301744.
8. **Аношин А.О., Головин А.В.** Протоколы связи в электроэнергетике. Предпосылки для создания стандарта МЭК 61850 // Новости ЭлектроТехники. – 2012. – № 3(75).
9. **Гречухин В.Н., Лебедев В.Д., Гречухин М.А.** Стратегия и технические решения по обеспечению цифровыми ТТ и ТН метрологии и надежности систем РЗА и учета электроэнергии на подстанциях 110–220 кВ // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 3(8). – С. 58–63. – EDN PCDXGP
10. **Horak J., Hrabliuk J.** Current Transformer Errors and Transformer Inrush as Measured by Magnetic, Optical and Other Unconventional CTs, 2016. – URL: http://idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Current_Transformer_Errors_and_Transformer_Inrush.pdf

11. **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. – EDN HFLWBF.

12. **Гречухин В.Н., Лебедев В.Д.** Цифровой комбинированный трансформатор тока и напряжения на базе стандартного трансформатора напряжения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № SD. – С. 98–99.

13. **Лебедев В.Д., Филатова Г.А., Нестерихин А.Е.** Измерительные преобразователи тока для цифровых устройств релейной защиты и автоматики // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 03–07 июля 2013 года. – Екатеринбург: Российский национальный комитет СИГРЭ, 2013. – С. 167–173. – EDN IBAGSO.

14. **Specific** features of digital current and voltage transformers for relay protection, automation and commercial electric power metering / V.D. Lebedev, A.A. Yablokov, G.A. Filatova, N.V. Lebedeva // 2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation, RPA 2018. – 2018. – P. 8537187.

15. **Пат.** на полезную модель № 174357 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.; № 2017112540; заявл. 12.04.2017; опубл. 11.10.2017 заявитель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное объединение «Цифровые измерительные трансформаторы». – EDN PIYXRF.

16. **Релейная** защита «мертвой» зоны распределительных устройств объектов электроэнергетики / А.В. Жуков, В.С. Воробьев, А.И. Расщепляев и др. // Релейная защита и автоматика энергосистем: сб. докл. XXII конф., Москва, 27–29 мая 2014 года. – М., 2014. – С. 14–20. – EDN ABNVND.

17. **Modeling** of measuring current and voltage transformers in dynamic modes / V. Lebedev, V. Shuin, A. Yablokov, G. Filatova // Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – Tomsk, 2014.

18. **Filatova G., Lebedev V., Shuin V.** Study of possibility of digital voltage transformers usage in fault location determination // Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Chelyabinsk, 2016. – P. 1–4.

19. **Kojovich L.A., Bishop M.M.** Modern relay protection using current sensors based on Rogowski coil // Proceedings of the International Conference on Actual Trends in Development of

Power System Protection and Automation. – Moscow, 2009. – P. 39–48.

20. **Kuvshinov G.G.** Modern directions of the development of the measuring current converters for relay protection and automatics. – Vladivostok, 2012. – P. 316.

21. **Кожович Л.** Катушки Роговского – реальная альтернатива традиционным ТТ. – URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2017/05/24/katushki-rogovskogo-realnaya-alternativa-traditsionnym-tt/>

22. **Kojovic L.A.** PCB Rogowski Coils–High Precision Low Power Sensors, Materials of CIGRE Session. 2004. <http://www.trans-form.ru/articles/pdf/SIGRE/a3-102.pdf>

23. **Kojovic L.** Rogowski coils suit relay protection and measurement. IEEE Computer Applications // Power. – 1997. – Vol. 10, no. 3. – P. 47–52.

24. **Лебедев В.Д., Яблоков А.А., Нестерихин А.Е.** Исследование погрешностей измерения тока поясом Роговского на основе математического и физического моделирования // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 6. – С. 30–34. – EDN RRYZSN.

25. **Теория и практика** применения цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения / В.Д. Лебедев, Н.В. Кузьмина, Д.Г. Григорьев и др. // Релейщик. – 2023. – № 1(45). – С. 42–49. – EDN TLKQBG.

26. **Вайнштейн Р.А., Шестакова В.В., Кац И.М.** Автоматическое управление электроэнергетическими системами в нормальных и аварийных режимах: учеб. пособие. Ч. 2 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2013. – 124 с.

References

1. Shneerson, E.M. *Tsifrovaya reley'naya zashchita* [Digital Relaying]. Moscow: Energoatomizdat, 2007. 549 p.

2. Horowitz, S.H., Phadke, A.G. Power systems relaying. West Sussex, England: John Wiley & Sons Inc, Ltd, 2008.

3. Honorato, T.R., Silva, K.M. Half-Cycle DFT-Based Phasor Estimation Algorithm for Numerical Digital Relaying. 2018 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS). Brasília, Brazil, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/WCNPS.2018.8604396.

4. Phadke, A.G., Thorp, J.S. Computer Relaying for Power Systems. JohnWiley & Sons Inc, West Sussex, UK, 2009.

5. Chen, Ching-Shan, Liu, Chih-Wen, Jiang, J.-A. Application of combined adaptive Fourier filtering technique and fault detector to fast distance protection. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, April, vol. 21, no. 2, pp. 619–626. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.858808.J

6. Rosolowski, E., Izykowski, E., Kasztenny, B. New half-cycle adaptive phasor estimator immune

to the decaying DC component for digital protective relaying. Proceedings of the 32nd Annual North American Power Symposium. Waterloo, Canada, 2000.

7. Revyakin, V.A., Pletnev, S.V., Klimova, T.G. Using the Fourier Transform of the Half-Cycle to Enhance the Application of the PMU. 2020 3rd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA). Moscow, 2020, pp. 1–14. DOI: 10.1109/RPA51116.2020.9301744.

8. Anoshin, A.O., Golovin, A.V. Protokoly svyazi v elektroenergetike. Predposylki dlya sozdaniya standarta MEK 61850 [Communication protocols in the electric power industry. Prerequisites for the creation of the IEC 61850 standard]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2012, no. 3(75).

9. Grechukhin, V.N. Strategiya i tekhnicheskie resheniya po obespecheniyu tsifrovymi TT i TN metrologii i nadezhnosti sistem RZA i ucheta elektroenergii na podstantsiyakh 110–220 kV [Strategy and technical solutions for providing digital CT and VT metrology and reliability of relay protection and electricity metering systems at 110–220 kV substations]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2012, no. 3(8), pp. 58–63. EDN PCDXGP.

10. Horak, J., Hrabliuk, J. Current Transformer Errors and Transformer Inrush as Measured by Magnetic, Optical and Other Unconventional CTs, 2016. Available at: http://idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Current_Transformer_Errors_and_Transformer_Inrush.pdf

11. Grechukhin, V.N. Elektronnye transformatory toka i napryazheniya. Sostoyanie, 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. EDN HFLWBF.

12. Grechukhin, V.N., Lebedev, V.D. Tsifrovoy kombinirovanny transformator toka i napryazheniya na baze standartnogo transformatora napryazheniya [Digital combined current and voltage transformer based on a standard voltage transformer]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2010, no. SD, pp. 98–99.

13. Lebedev, V.D., Filatova, G.A., Nesterikhin, A.E. Izmeritel'nye preobrazovateli toka dlya tsifrovyykh ustroystv releynoy zashchity i avtomatiki [Current measuring transducers for digital relay protection and automation devices]. *Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sovremennye napravleniya razvitiya sistem releynoy zashchity i avtomatiki energosistem". Ekaterinburg, 03–07 iyul'ya 2013 goda* [Proceedings of the IV International scientific technical conference "Current trends of development of relay protection systems and automation of power systems". Ekaterinburg, July 03–07, 2013]. Ekaterin-

burg: Rossiyskiy natsional'nyy komitet SIGRE, 2013, pp. 167–173. EDN IBAGSO.

14. Lebedev, V.D., Yablokov, A.A., Filatova, G.A., Lebedeva, N.V. Specific features of digital current and voltage transformers for relay protection, automation and commercial electric power metering. 2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation, RPA, 2018, p. 8537187.

15. 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. 174357, 2017. EDN PIYXRF.

16. Zhukov, A.V., Vorob'ev, V.S., Rashcheplyayev, A.I., Artsishevskiy, A.L., Kuzin, A.S., Borisov, R.K., Lebedev, V.D. Releynaya zashchita «mertvoy» zony raspredelitel'nykh ustroystv ob"ektov elektroenergetiki [Relay protection of the «dead» zone of switchgears of electric power facilities]. *Sbornik dokladov XXII konferentsii "Releynaya zashchita i avtomatika energosistem", Moskva, 27–29 maya 2014 goda* [Proceedings of the XXII conference "Relay protection and automation of power systems", Moscow, May 27–29, 2014]. Moscow, 2014, pp. 14–20. EDN ABNVND.

17. Lebedev, V., Shuin, V., Yablokov, A., Filatova, G. Modeling of measuring current and voltage transformers in dynamic modes. Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). Tomsk, 2014.

18. Filatova, G., Lebedev, V., Shuin, V. Study of possibility of digital voltage transformers usage in fault location determination. Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Chelyabinsk, 2016, pp. 1–4.

19. Kojovich, L.A., Bishop, M.M. Modern relay protection using current sensors based on Rogowski coil. Proceedings of the International Conference on Actual Trends in Development of Power System Protection and Automation. Moscow, 2009, pp. 39–48.

20. Kuvshinov, G.G. Modern directions of the development of the measuring current converters for relay protection and automatics. Vladivostok Branch of Russian Customs Academy (VBRCA). Vladivostok, 2012, p. 316.

21. Kozhovich, L. *Katushki Rogovskogo – real'naya alternativa traditsionnym TT* [Rogowski coils – a real alternative to traditional CTs]. Available at: <http://digitalsubstation.com/blog/2017/05/24/katushki-rogovskogo-realnaya-alternativa-traditsionnym-tt/>

22. Kojovic, L.A. PCB Rogowski Coils–High Precision Low Power Sensors, Materials of CIGRE Session, 2004. Available at: <http://www.transform.ru/articles/pdf/SIGRE/a3-102.pdf>

23. Kojovic, L. Rogowski coils suit relay protection and measurement. IEEE Computer Applications in Power, 1997, vol. 10, no. 3, pp. 47–52.

24. Lebedev, V.D., Yablokov, A.A., Nesterikhin, A.E. Issledovanie pogreshnostey izmereniya toka poyasom Rogovskogo na osnove matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya [Study of current measurement errors using a Rogowski coil based on mathematical and physical modeling]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 6, pp. 30–34. EDN RRYZSN.

25. Lebedev, V.D., Kuzmina, N.V., Grigorev, D.G., Litvinov, S.N., Petrov, A.E. Teoriya i praktika primeneniya tsifrovyykh izmeritel'nykh

transformatorov toka i napryazheniya [Theory and practice of using digital instrument current and voltage transformers]. *Releyshchik*, 2023, no. 1(45), pp. 42–49. EDN TLKQBG

26. Vaynshteyn, R.A., Shestakova, V.V., Kats, I.M. *Avtomaticheskoe upravlenie elektro-energeticheskimi sistemami v normal'nykh i avariynykh rezhimakh. Ch. 2* [Automatic control of electrical power systems in normal and emergency modes. Part 2]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2013. 124 p.

УДК 621.31

Ольга Сергеевна Мельникова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-23, e-mail: o.s.melnikova@mail.ru

Алина Михайловна Чикалева

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-23, e-mail: zebraib@mail.ru

Сергей Викторович Воробьев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-23, e-mail: vsv-ivanovo@yandex.ru

Разработка и исследование имитационной модели мультикамерного разрядника для грозозащитного троса

Авторское резюме

Состояние вопроса. Грозозащитные тросы со встроенным оптическим волокном являются эффективным решением для прокладки магистральных цифровых коммуникаций вдоль высоковольтных линий электропередачи. Это позволяет использовать уже существующую инфраструктуру энергосети и обеспечить передачу большого объема данных. Протекание токов молнии и токов короткого замыкания может вызвать нарушение термической стойкости оптоволокна и ухудшение его производительности. При изолированной подвеске грозозащитных тросов со встроенным оптическим волокном через изолятор, шунтированный искровым промежутком, в процессе эксплуатации возможно изменение расстояния в разрядном промежутке за счет смещения электродов в плоскости, а также при близости места короткого замыкания будут происходить множественные перекрытия и, как следствие, через грозозащитный трос со встроенным оптическим волокном будет протекать ток КЗ. В связи с этим представляется перспективным рассмотрение возможности применения устройства с многоэлектродной системой, построенного по принципу мультикамерного разрядника, в качестве замены искрового промежутка для повышения надежности работы узла с изолированной подвеской грозозащитного троса со встроенным оптическим волокном.

Материалы и методы. Моделирование устройства выполнено в программном комплексе ANSYS Maxwell, математический аппарат которого основан на использовании дифференциальных уравнений Максвелла и методе конечных элементов, позволяющем с достаточно высокой точностью выполнять численное моделирование.

Результаты. Разработана имитационная модель мультикамерного разрядника в программном комплексе ANSYS Maxwell и выполнены расчеты распределения напряжения и напряженности электрического поля. Для системы электродов модели мультикамерного разрядника определено неравномерное распределение приложенного напряжения по искровым разрядным промежуткам камер. Показано, что при воздействии напряжения на разрядник между потенциальным и последующим электродами возникает наибольшая напряженность электрического поля, что при увеличении напряжения приводит к каскадности срабатывания разрядных промежутков, которая обеспечивает требуемые низкие разрядные напряжения срабатывания разрядника в целом.

Выводы. Разработанная упрощенная имитационная модель мультикамерного разрядника показала необходимую для каскадного срабатывания картину распределения напряжения и напряженности электрического поля между различными электродами. На основании проведенных исследований определена конфигурация электродов для разработки физического прототипа и дальнейших исследований мультикамерного разрядника.

Ключевые слова: высоковольтные линии электропередач, мультикамерный разрядник, имитационная модель мультикамерного разрядника, молниезащитные тросы, напряженность электрического поля

Olga Sergeevna Melnikova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of High-Voltage Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electrophysics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-23, e-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Alina Mikhailovna Chikaleva

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of High-Voltage Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electrophysics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-23, e-mail: zebatb@mail.ru

Sergey Viktorovich Vorobyov

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of High-Voltage Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electrophysics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-23, e-mail: vsv-ivanovo@yandex.ru

Development and research of a simulation model of a multi-chamber arrester for lightning protection cable

Abstract

Background. Optical fiber overhead ground wire (OPGW) is an effective solution for laying mainline digital communications along high-voltage power lines. It allows you to use the existing infrastructure of the power grid and ensure the transfer of a large amount of data. The flow of lightning currents and short-circuit currents can cause a violation of the thermal resistance of the fiber and a deterioration of its performance. When the OPGW is insulated through an insulator shunted by a spark gap, during operation it is possible to change the distance in the discharge gap due to the displacement of the electrodes in the plane. Also, when the short circuit location is close, multiple overlaps will occur and as a result, short circuit current will flow through the OPGW. Thus, the article considers the possibility to use a device with a multielectrode system developed on the principle of a multichamber spark gap as a replacement of the spark gap to increase the reliability of the unit with an isolated OPGW suspension.

Materials and methods. Modeling of the device has been carried out in the ANSYS Maxwell software package, the mathematical apparatus of which is based on the use of Maxwell's differential equations and the finite element method, which allows performing numerical modeling with sufficiently high accuracy.

Results. A simulation model of a multichamber spark gap has been developed in the ANSYS Maxwell software package and calculations of electrical characteristics have been performed. For the electrode system of a multi-chamber arrester, an uneven distribution of the applied voltage across the spark discharge gaps of the chambers is determined. It is shown that when a voltage is applied to a spark gap, the highest electric field strength occurs between the first and second electrodes, and then a cascade of discharge gaps occurs, which provides the required low discharge voltages of the spark gap as a whole.

Conclusions. The developed simplified simulation model of a multi-chamber arrester has shown all the necessary conditions for cascade imaging of the voltage distribution and the electric-field strength of various electrode options. Based on the research conducted electrodes geometry is identified for smart prototype development and ongoing multi-chamber arrester research.

Key words: High-voltage power lines, multi-chamber arrester, simulation model of a multi-chamber arrester, lightning protection cables, electric field strength

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.049-058

Введение. В настоящее время в Российской Федерации целенаправленно реализуется программа цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса (ТЭК). Эта работа включает в себя целый ряд масштабных проектов – от внедрения информационных технологий (ИТ) удаленного присутствия на объектах энергетики до разработки мобильных сервисов для клиентов. В основе программы лежат сквозные информационные направления, формирующие единое пространство разработки и реализации цифровых технологий в электроэнергетической системе [1].

Конечные цели проводимой цифровой трансформации – повышение надежности, безопасности и эффективности ТЭК России. Программа реализуется с опорой на отечественных производителей оборудования и программного обеспечения (ПО). Это стимулирует их развитие, содействует укреплению технологического суверенитета энергетической отрасли и страны в целом [2, 3].

Необходимость строительства магистральных цифровых коммуникаций для передачи все большего объема данных заставляет использовать для прокладки линий связи существующую инфраструктуру

энергосети. Одним из распространенных методов является установка оптоволоконных линий связи вдоль высоковольтных линий электропередачи. Для новых и реконструируемых линий электропередачи наиболее надежным и привлекательным решением является включение оптического модуля в грозозащитный трос (ОКГТ).

Воздушные электрические сети часто поражаются молнией из-за своей большой протяженности. Например, линия длиной всего 50 км при средней высоте подвеса молниезащитного троса 15 м (или проводов, если трос отсутствует), проходящая по территории с 30 грозовыми часами в году, поражается в среднем 9 раз в год. От подстанции отходят обычно несколько линий, которые совместно подвергаются ударам молнии многие десятки раз за грозовой сезон [4].

Оптоволокно, встроенное в грозозащитный трос, может разрушаться под воздействием различных электрических и механических факторов. При протекании через ОКГТ токов молнии и токов КЗ происходит нарушение термической стойкости оптоволокна и ухудшение его механических характеристик [5, 6].

По результатам анализа [7] требований нормативных документов отмечено, что для грозозащитных тросов, в том числе со встроенным оптическим волокном, допускается любая схема заземления.

Таким образом, к опорам грозозащитный трос может быть присоединен наглухо, через изолятор или изоляторы, а также комбинированным способом, т.е. изолированное крепление троса к опорам сочетается с его глухим заземлением в одной или двух точках анкерного участка линии [8]. Для ОКГТ независимо от напряжения ВЛ, согласно «Правилам устройства электроустановок»¹, рекомендуется заземление троса на каждой опоре.

При заземлении троса на каждой опоре возникает контур, образованный тросом, опорой и землей, что, в соответствии с законом электромагнитной индукции, приводит к возникновению взаимоиндукции между фазными проводниками и заземленными участками грозозащитных тросов. В результате этого в тросе появля-

ется индуцированный ток, величина которого во многом зависит от мощности, передаваемой по ВЛ, и геометрии опор.

Изолированная подвеска чаще всего реализуется путем подвески грозозащитного троса на опоре через линейный изолятор, шунтированный искровым разрядником. К недостаткам подобного способа крепления тросов следует отнести низкую надежность искрового промежутка ввиду нестабильности характеристик газового разряда в резко неоднородных электрических полях. В процессе эксплуатации возможно изменение расстояния S (рис. 1) в разрядном промежутке за счет смещения электродов в плоскости при вибрациях, колебаниях или недостаточной затяжке монтажных болтов. А также при близости места короткого замыкания будут происходить множественные перекрытия [9].

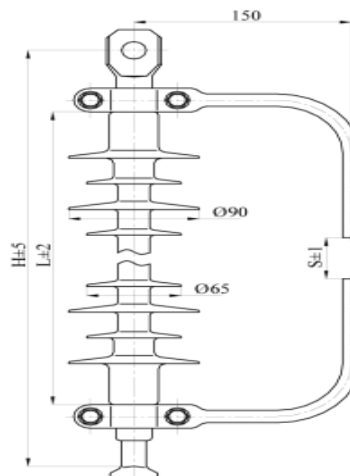


Рис. 1. Изолятор линейный типа ЛКГ70(120) для крепления грозотроса

Для повышения надежности работы узла с изолированной подвеской ОКГТ в качестве замены искрового промежутка рассматривается применение устройства с многоэлектродной системой, построенного по принципу мультикамерного разрядника [10, 11].

Такие разрядники используют мультикамерную систему (МКС), которая состоит из нескольких камер, каждая из которых имеет свои электроды. Когда на разрядник действует импульс грозового перенапряжения, промежутки между электродами пробиваются. Так как разряды происходят внутри камер, которые относительно малы, при расширении канала создается высокое давление. Это приводит к перемещению

¹ Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. (ПУЭ) / Главгосэнергонадзор России. – М.: Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2007. – 610 с.

искровых разрядов от электродов к поверхности изоляционного материала и их выдуванию наружу, в окружающий воздух.

Для корректной работы мультикамерного разрядника должно обеспечиваться каскадное срабатывание его дугогасящих камер, т. е. последовательное перекрытие промежутков между электродами. Это позволяет достичь желаемых низких значений разрядного напряжения для активации мультикамерных разрядников в целом [11].

Исследования [10, 11] показывают эффективность использования мультикамерных разрядников при молниезащите ВЛ, но возможности применения таких систем для изолированной подвески ОКГТ не отражены в полной мере. Исходя из вышесказанного, разработка таких систем является актуальной задачей.

Ниже предлагается имитационная модель подобного мультикамерного разрядника, который может быть использован вместо разрядных рогов (РР) в случае изолированного крепления ОКГТ.

Эффективность мультикамерного разрядника основана на неравномерном распределении напряжения и напряженности электрического поля, которое обеспечивает каскадность его срабатывания. Главной задачей является получение именно такого

распределения напряжения и напряженности электрического поля между электродами разрядника. Это распределение зависит от конфигурации электродов, их количества и расстояния между ними.

Создание и исследование имитационной модели мультикамерного разрядника. На основе анализа практических исследований в области мультикамерных систем [10, 11] была предложена концепция мультикамерного разрядника (рис. 2), для которой выполнялось имитационное моделирование.

Корпус разрядника должен быть выполнен из трекингоэрозийностойкого материала. В качестве электродов в первом приближении используются шары диаметром 12 мм из нержавеющей стали. Для гашения дуги сопровождающего тока предлагается выполнять газоразрядную камеру из газогенерирующего материала (рис. 3). Все размеры модели разрядника соответствуют представленным на рис. 2, 3.

На основе этой концепции была разработана имитационная модель в программном комплексе ANSYS Maxwell с применением решателя Electrostatic, позволяющего произвести анализ электрического поля разрядника, характеризующего состояние разрядника до его срабатывания.

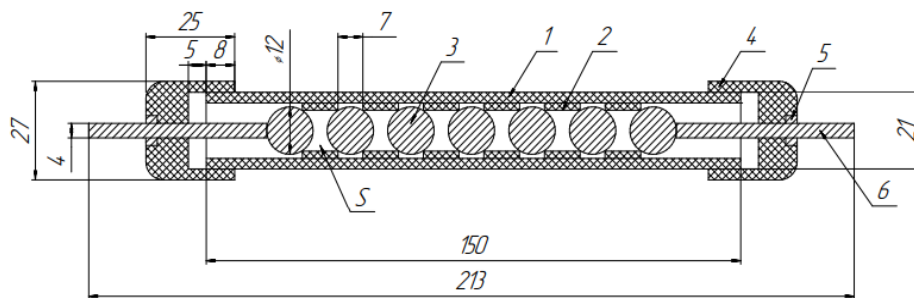


Рис. 2. Базовая модель мультикамерного разрядника: 1 – корпус; 2 – дугогасящая камера из газогенерирующего материала; 3 – электрод; 4 – крышка; 5 – гайка; 6 – контактная клемма

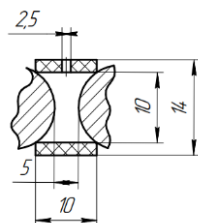


Рис. 3. Дугогасящая камера

Общий вид основных составляющих разрядника (корпус, клеммы, электроды) представлен на рис. 4.

Для решения электростатической задачи предполагается, что все объекты находятся в покое (без движения) и не изменяются со временем. Распределение удельной проводимости в пространстве не имеет значения, важно только распределение диэлектрической проницаемости.

ANSYS Maxwell решает дифференциальное уравнение Пуассона в частных производных для неизвестного электрического потенциала Φ с соответствующими граничными условиями:

$$\nabla(\varepsilon_r \varepsilon_0 \nabla \Phi) = -\rho_v, \quad (1)$$

где $\Phi(x, y, z)$ – электрический потенциал, который является скалярной функцией положения; $\varepsilon_r(x, y, z)$ – относительная диэлектрическая проницаемость, которая является функцией положения и может быть изотропной или ортотропной; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума (Ф/м); $\rho_v(x, y, z)$ – объемная плотность электрического заряда.

Когда электрический потенциал определен путем решения уравнения (1) второго порядка в области модели, по уравнениям Максвелла и теоретическим формулам вычисляются вектора напряженности электрического поля \vec{E} и электрической индукции \vec{D} следующим образом:

$$\vec{E} = -\nabla \Phi; \quad (2)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \vec{E}. \quad (3)$$

Источниками для данной электростатической задачи в ANSYS Maxwell являются *Voltages* и *Floating*².

Поскольку неравномерность распределения напряжения искрового промежутка в значительной степени зависит от распределения напряжения по емкостям, важно учесть не только собственные емкости разрядника [12]: емкость на землю и емкость на грозозащитный трос были отражены в модели через два дополнительных цилиндра. Поверхность цилиндра, моделирующего емкость на землю, несоизмерима больше по сравнению с моделью разрядника. Цилиндр, моделирующий емкость на грозозащитный трос, имеет несоизмеримо большую длину относительно разрядника. Оба цилиндра выполнены из проводящего материала, а заряд на них задается источником *Voltage*. Имитационная модель, учитывающая емкости на землю и на грозозащитный трос, представлена на рис. 5.

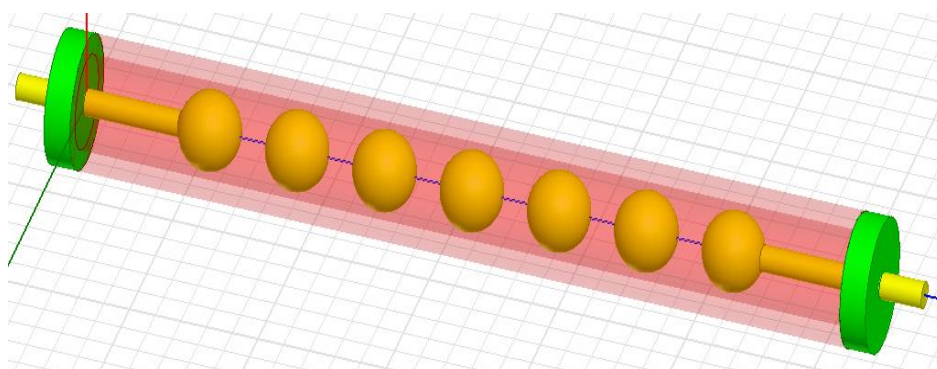


Рис. 4. Модель мультикамерного разрядника в программе ANSYS Maxwell

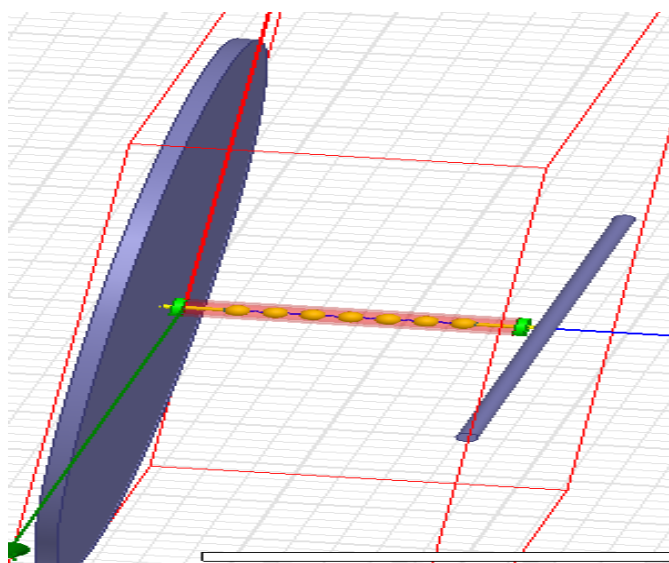


Рис. 5. Модель мультикамерного разрядника с учетом дополнительных емкостей

² Интернет ресурс <https://ansoft-maxwell.ru/maxwell/ElectricFieldCalculation.htm>

Результаты расчетов. Результаты расчета электростатического поля модели мультикамерного разрядника представлены на рис. 6–8.

При воздействии напряжения на разрядник между первым и вторым электродами возникает наибольшая напряженность электрического поля (рис. 8). Дальнейшее увеличение напряжения, соответствующее нарастанию грозового импульса, однозначно вызовет пробой этого искрового промежутка и перенос потенциала с первого электрода на второй. Далее физическая картина пробоя искровых промежутков повторяется [11]. Таким образом, происходит каскадное, т.е. последовательное, перекрытие промежутков между электродами. Благодаря каскадности срабатывания разрядных промежутков обеспечиваются требуемые низкие разрядные напряжения срабатывания мультикамерного разрядника в целом.

Влияние формы электродов, их размера и расстояния между ними оценива-

лось по коэффициенту неоднородности электрического поля.

Коэффициент неоднородности k_n определялся как отношение максимальной напряженности в промежутке к средней [5]

$$k_n = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{сред}}} \quad (4)$$

Средняя напряженность составляет

$$E_{\text{сред}} = \frac{\Delta U}{S}, \quad (5)$$

где ΔU – падение напряжения на электродах; S – расстояние между электродами (для базового варианта составляет 5 мм).

Максимальное значение напряженности поля определялось по графикам, примеры которых приведены на рис. 8–12 для различных вариантов электродных систем (см. таблицу).

С учетом вышеизложенного коэффициент неоднородности поля следует определять в первом межэлектродном промежутке мультикамерного разрядника.

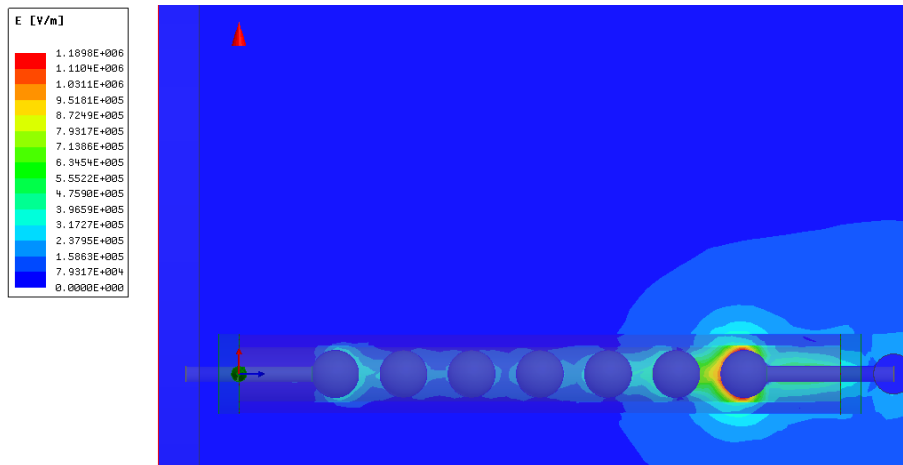


Рис. 6. Распределение напряженности электростатического поля модели МКС

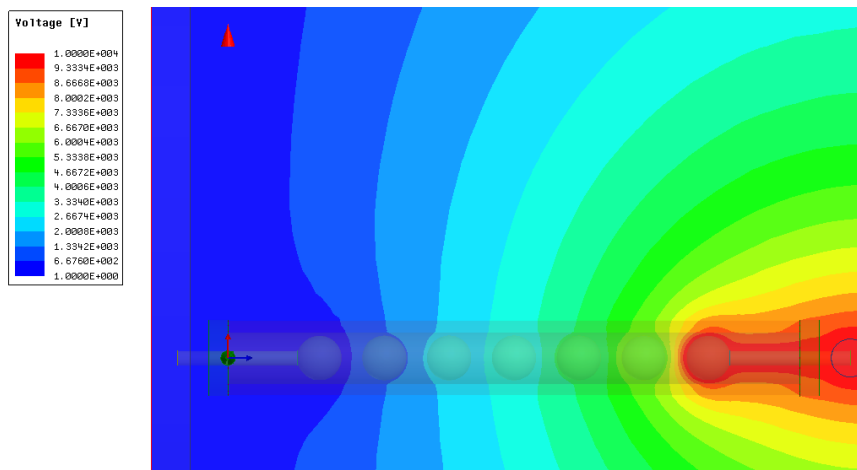


Рис. 7. Распределение потенциала в межэлектродной системе мультикамерного разрядника

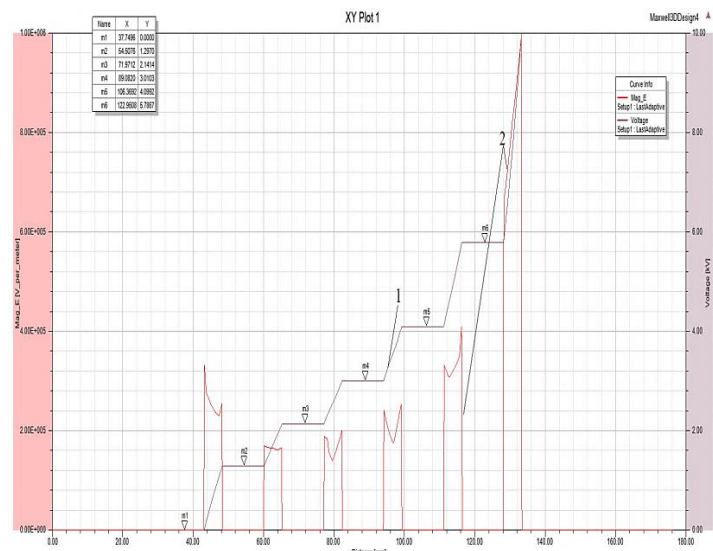


Рис. 8. Графики распределения напряжения (1) и напряженности (2) модели МКС для базового варианта

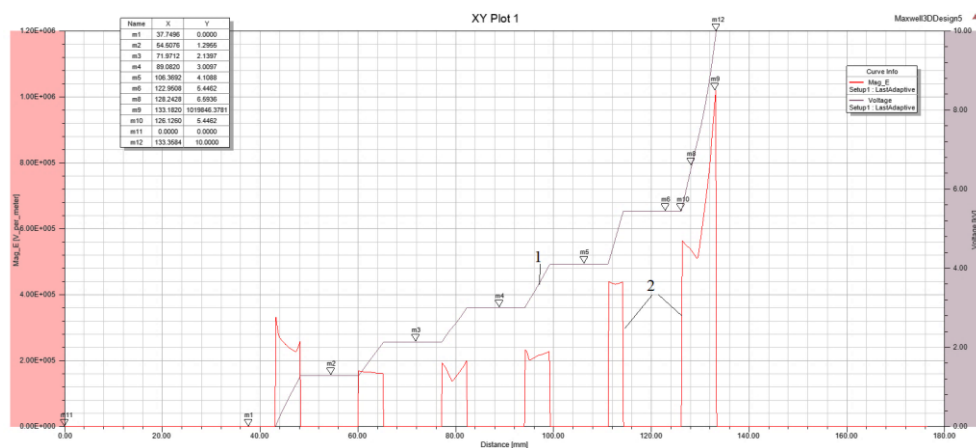


Рис. 9. Графики распределения напряжения (1) и напряженности (2) электрического поля модели МКС для варианта 1

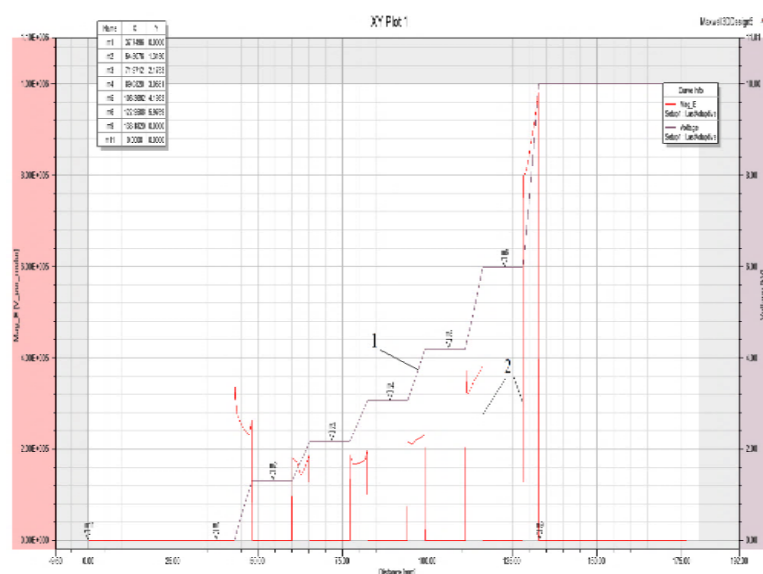


Рис. 10. Графики распределения напряжения (1) и напряженности (2) электрического поля модели МКС для варианта 2

Средняя напряженность $E_{\text{сред}}$ в первом межэлектродном промежутке определяется с учетом падения напряжения ΔU , которое рассчитывается по известным потенциалам (рис. 8–12).

Тогда

$$\Delta U = U_1 - U_2, \quad (6)$$

где U_1 – потенциал первого электрода; U_2 – потенциал второго электрода.

Исследовался диапазон изменения радиуса электродов от 5 до 6,5 мм и расстояния между ними от 5 до 7 мм.

Результаты расчетов коэффициента неоднородности представлены в таблице.

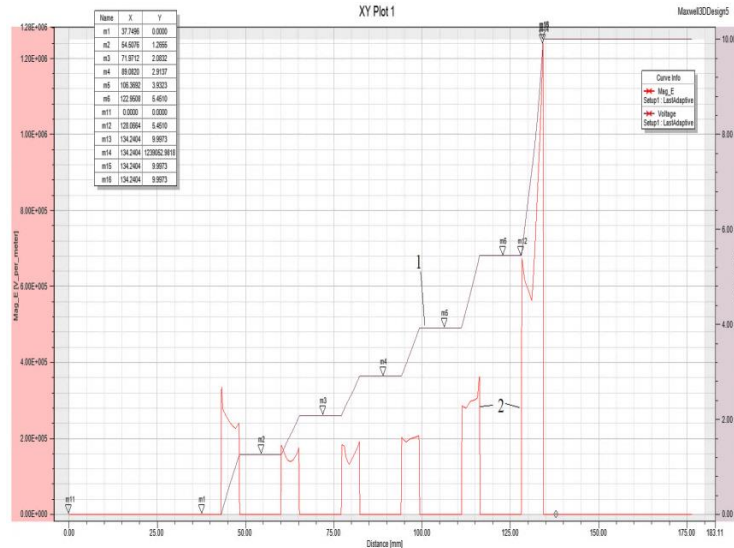


Рис. 11. Графики распределения напряжения (1) и напряженности (2) модели МКС для варианта 3

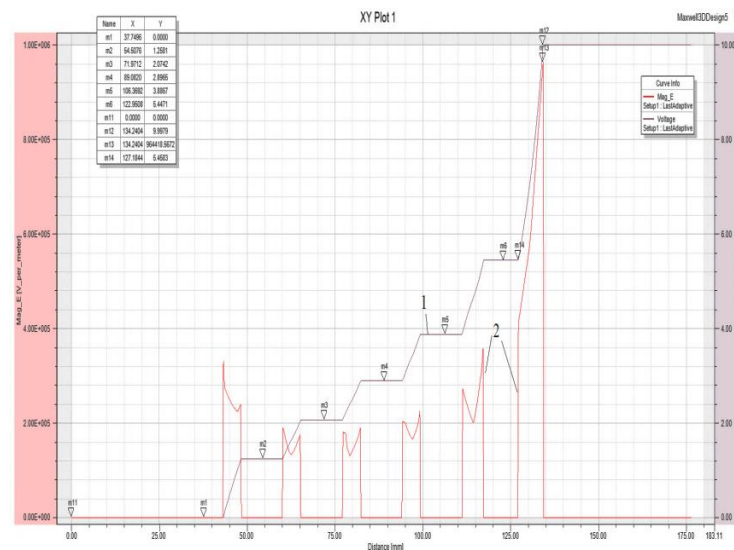


Рис. 12. Графики распределения напряжения (1) и напряженности (2) модели МКС для варианта 4

Расчет коэффициента неоднородности электрического поля

Особенности конфигурации	Коэффициент неоднородности электрического поля					
	K_{H1-2}	K_{H2-3}	K_{H3-4}	K_{H4-5}	K_{H5-6}	K_{H6-7}
Базовый вариант	1,2	1,18	1,17	1,16	1,01	1,28
Увеличение первого межэлектродного промежутка до 7 мм при $r_{эл} = 6$ мм (вариант 1)	1,57	1,65	1,05	1,16	1,06	1,27
Увеличение радиуса первого электрода до 6,5 мм при расстоянии между электродами 5 мм (вариант 2)	1,34	1,06	1,02	1,04	1,04	1,28
Уменьшение радиуса первого электрода до 5 мм при расстоянии между электродами 5 мм (вариант 3)	1,6	1,18	1,06	1,12	1,06	1,31
Уменьшение радиуса первого и второго электродов до 5 мм при расстоянии между электродами 5 мм (вариант 4)	1,5	1,15	1,19	1,14	1,17	1,33

Результаты расчета показывают, что увеличение первого межэлектродного промежутка и уменьшение радиуса первого электрода оказывают определяющее влияние на электрическое поле модели МКС. При таком изменении конфигурации электродов происходит увеличение коэффициента неоднородности более чем на 30 %. Отмечается, что при увеличении первого межэлектродного промежутка наблюдается усиление электрического поля и в последующих промежутках. Влияние изменения радиуса первого электрода на электрическое поле модели МКС незначительно.

Выводы. Анализ результатов расчета распределения напряжения и напряженности электрического поля с использованием разработанной имитационной модели мультикамерного разрядника в программном комплексе ANSYS Maxwell показал: неравномерное распределение приложенного напряжения по искровым разрядным промежуткам для рассматриваемых вариантов электродов МКС; наибольшую напряженность электрического поля в первом искровом промежутке, что является необходимым условием каскадного срабатывания разрядных промежутков для обеспечения требуемых низких разрядных напряжений.

Полученные результаты показывают, что при изменении размера электродов и расстояния между ними для сохранения каскадности срабатывания следует рассматривать вариант с уменьшенным радиусом первого электрода. Тогда в первом межэлектродном промежутке создается достаточная неоднородность поля (коэффициент неоднородности от 1,5 до 2), при этом сохраняется приближенное к однородному поле в остальных межэлектродных промежутках (коэффициент неоднородности менее 1,5). Исследование МКС разрядника необходимо дополнить моделированием электродинамических процессов, происходящих во время разряда, а также определением вольт-секундной характеристики МКС и эффективности газогенерирующих камер.

Список литературы

1. **Актуальные** вопросы цифровой трансформации электросетевого комплекса // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 1(76). – С. 6–16. – EDN PBOPJH.
2. **Хренников А.Ю., Любарский Ю.Я.** Цифровизация в электроэнергетике: эксплуатация и оперативное управление электрическими сетями // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – № 4(67). – С. 44–50. – EDN VYSUCS.
3. **Energy Sector Enterprises in Digitalization Program: Its Implication for Open Innovation** / Y. Valeeva, M. Kalinina, L. Sargu, et al. // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. – 2022. – Vol. 8, No. 2. – DOI: 10.3390/joitmc8020081. – EDN FCDQLT.
4. **Техника** высоких напряжений: учеб. для вузов / И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, Н.И. Гумерова, Г.М. Иманов; под ред. Г.С. Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд-ние, 2003. – 608 с.
5. **Дмитриев М.В., Родчихин С.В.** Расчет термической стойкости грозозащитных тросов ВЛ 110–750 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2017. – № 3(42). – С. 66–69. – EDN ZEPJLF.
6. **Damage Characteristics of OPGWs under Consecutive Lightning Strikes Based on a Coupled Arc-Thermal-Electric Simulation** / Jinru Sun, Shu Li, Qin Qing, et al. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2023, June. – Vol. 38, Issue 3.
7. **Дмитриев М.В., Родчихин С.В.** Грозозащитные тросы ВЛ 35–750 кВ. Выбор мест заземления // Новости ЭлектроТехники. – 2017. – № 2(104). – С. 2–5.
8. **Якушева Ю.С.** Грозозащита и заземление. Молниеотводы, грозозащитные тросы и разрядники // Актуальные проблемы энергетики: материалы 70-й науч.-техн. конф. студ. и асп. / Белорусский национальный технический университет. Энергетический факультет. Секция 2: Электрические системы. – Минск: БНТУ, 2014. – С. 104–105.
9. **Ефремов И.А., Кузьмин А.А.** Роль грозозащитных тросов в процессах короткого замыкания // Доклады ТУСУРа. – 2012, июнь. – № 1(25). – Ч. 1.
10. **Research on Compact Design of Multi-chamber Arc-extinguishing Structure for Lightning Protection** / Shizun Pu, Wenbin Jia, Hongmei Li, et al. // 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). – Beijing, China, 2020.
11. **Overhead Lines Lightning Protection by MultiChamber Arresters and Insulator-Arrester** / G.V. Podporkin, V.E. Pilshikov, E.S. Kalakutsky, A.D. Sivaev // 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP). – Shanghai, China, 2014.
12. **Вентильные** разрядники высокого напряжения / Д.В. Шишман, А.И. Бронфман, В.И. Пружинина, В.П. Савельев. – Л.: Изд-во «Энергия», 1971. – 262 с.

References

1. Aktual'nye voprosy tsifrovoy transformatsii elektrosetevogo kompleksa [Current issues of digital transformation of the electric grid complex]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2023, no. 1(76), pp. 6–16. EDN PBOPJH.
2. Khrennikov, A.Yu., Lyubarskiy, Yu.Ya. Tsifrovizatsiya v elektroenergetike: ekspluatatsiya i operativnoe upravlenie elektricheskimi setyami [Digitalization in the electric power industry: operation and operational management of electric networks]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2021, no. 4(67), pp. 44–50. EDN VYSUCS.
3. Valeeva, Y., Kalinina, M., Sargu, L., Kulachinskaya, A., Ilyashenko, S. Energy Sector Enterprises in Digitalization Program: Its Implication for Open Innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 2022, vol. 8, no. 2. DOI: 10.3390/joitmc8020081. EDN FCDQLT.
4. Bogatenkov, I.M., Bocharov, Yu.N., Gumerova, N.I., Imanov, G.M. *Tekhnika vysokikh napryazheniy* [High voltage technique]. Saint-Petersburg: Energoatomizdat, 2003. 608 p.
5. Dmitriev, M.V., Rodchikhin, S.V. Raschet termicheskoy stoykosti grozozashchitnykh trosov VL 110–750 kV [Calculation of thermal resistance of lightning protection cables of 110–750 kV overhead line]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2017, no. 3(42), pp. 66–69. EDN ZEPJLF.
6. Sun, Jinru, Li, Shu, Qing, Qin, Guo, Yongqiang, Yao, Xueling. Damage Characteristics of OPGWs under Consecutive Lightning Strikes Based on a Coupled Arc-Thermal-Electric Simulation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2023, vol. 38, issue 3.
7. Dmitriev, M.V., Rodchikhin, S.V. Grozozashchitnye trosy VL 35–750 kV. Vybor mest zazemleniya [Lightning protection cables of 35–750 kV overhead line. The choice of grounding points]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2017, no. 2(104), pp. 2–5.
8. Yakusheva, Yu.S. Grozozashchita i zazemlenie. Molnieotvody, grozozashchitnye trosy i razryadniki [Lightning protection and grounding. Lightning rods, lightning protection cables and arresters]. *Materialy LXX nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov «Aktual'nye problemy energetiki»* [Materials of the 70th Scientific and Technical Conference of students and postgraduates “Actual problems of energy”]. Minsk: Belorusskiy natsional'nyy tekhnicheskii universitet, 2014, pp. 104–105.
9. Efremov, I.A., Kuz'min, A.A. Rol' grozozashchitnykh trosov v protsessakh korotkogo замыкания [The role of lightning protection cables in short circuit processes]. *Doklady TUSURa*, June 2012, no. 1(25), part 1.
10. Pu, Shizun, Jia, Wenbin, Li, Hongmei, Peng, Qingjun, Yang, Ronghua, Yuan, Tao. Research on Compact Design of Multi-chamber Arc-extinguishing Structure for Lightning Protection. 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). Beijing, China, 2020.
11. Podporkin, G.V., Pilshikov, V.E., Kalakutsky, E.S., Sivaev, A.D. Overhead Lines Lightning Protection by MultiChamber Arresters and Insulator-Arrester. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP). Shanghai, China, 2014.
12. Shishman, D.V., Bronfman, A.I., Pruzhinina, V.I., Savel'ev, V.P. *Ventil'nye razryadniki vysokogo napryazheniya* [High voltage valve arresters]. Leningrad: Izdatel'stvo «Energiya», 1971. 262 p.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313

Александр Евгеньевич Савенко

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства, Россия, Республика Крым, Керчь, e-mail: savenko-70@mail.ru

Павел Станиславович Савенко

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», аспирант кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства, Россия, Республика Крым, Керчь, e-mail: pashasavenko@gmail.com

Особенности работы кранового группового электропривода с частотным управлением на морском судне

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одной из важнейших задач повышения эффективности и надежности современных морских судов является исследование работы электрических приводов с частотным управлением. Существует достаточное количество научных работ, в которых проводится анализ и исследования на тему частотного управления электрическими приводами. Проблемы возникают при эксплуатации морских судов специального назначения, оснащенных мощным краном грузоподъемностью 250 тонн. Экипаж судна в условиях работы в открытом море не может полноценно эксплуатировать грузовой кран на полной скорости, так как он неожиданно отключается защитой и возникает аварийная ситуация. В связи с этим актуальным является совершенствование использования мощных групповых электроприводов на морских судах.

Материалы и методы. С применением метода пассивного эксперимента проведено исследование работы шести электромоторов мощностью по 400 кВт, которые приводят в движение лебедку главного гака крана. За работой частотного преобразователя и многоканального осциллографа осуществлялся постоянный мониторинг. Использование штатных функций системы управления частотного преобразователя позволяет контролировать и получать осциллограммы одновременно шести параметров: моментов, активных мощности и оборотов двигателей, полного тока лебедки. Необходимые корректировки и настройки системы управления частотными преобразователями произведены путем изменения параметризации карты обработки сигнала энкодера.

Результаты. Рассмотрена конструкция постаментного крана грузоподъемностью 250 тонн на трубоукладочном судне Seven Vega. Получены экспериментальные осциллограммы, характеризующие работу лебедки главного гака крана, при этом зафиксирован момент трипа (выбивания по перегрузке) на максимальной скорости одного из шести приводных электромоторов. Установлено, что такое срабатывание защиты приводит к невозможности продолжения подъема или спуска груза. Проведенные

исследования показали, что для применяемых в групповом крановом электрическом приводе энкодеров необходимо использовать закон расчета скорости вращения по полной длительности периода импульсов одного канала. После изменения параметризации карты обработки сигнала энкодера, обеспечивающей расчет скорости вращения каждого из шести электродвигателей, проведены длительные испытания, которые показали исправную работу лебедки главного гака крана на максимальных скоростях.

Выводы. Результаты проведенных исследований позволяют обеспечить качественную работу группового кранового электрического привода с частотным управлением. Установлено, что при выявлении несимметрии длительности импульсов в работе оптических энкодеров необходимо изменить метод расчета скорости частотным преобразователем в целях использования полной длительности периода импульсов одного канала, а не разницы между фронтами или спадами импульсов четырех каналов. Опыт проведенных исследований и ремонтно-наладочных работ может быть использован в различных электротехнических комплексах, в которых применяются групповые электрические приводы с частотными преобразователями Siemens.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, электрический привод, частотный преобразователь, осциллограмма, грузовой кран, энкодер, импульс

Alexander Evgenyevich Savenko

Kerch State Maritime Technological University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electrical Equipment of Ships and Production Automation Department, Russia, Republic of Crimea, Kerch, e-mail: savenko-70@mail.ru

Pavel Stanislavovich Savenko

Kerch State Maritime Technological University, Postgraduate Student of Electrical Equipment of Ships and Production Automation Department, Russia, Republic of Crimea, Kerch, e-mail: pashasavenko@gmail.com

Operation of crane group electric drive with frequency control on a marine vessel

Abstract

Background. One of the most important tasks to increase efficiency and reliability of modern sea vessels is the study of the operation of electric drives with frequency control. There is a sufficient number of scientific studies in which analysis and research is carried out on the topic of frequency control of electric drives. Problems occur when operating special-purpose sea vessels equipped with a powerful crane with a lifting capacity of 250 tons. The ship crew when working in the open sea, cannot fully operate the cargo crane at full speed, since it is suddenly switched off by the protection and an emergency occurs. In this regard, it is relevant to improve the use of powerful group electric drives on sea vessels.

Materials and methods. The authors have used a passive experiment method to study the operation of six electric motors with a power of 400 kW, which drive the winch of the crane main hook. The operation of the frequency converter and multichannel oscilloscope has been constantly monitored. Using the standard functions of the frequency converter control system allows you to monitor and obtain oscillograms of six parameters simultaneously: motor torques, active motor powers and engine rpm speed, total winch current. The necessary adjustments and settings of the frequency converter control system are carried out by changing the parameterization of the encoder signal processing card.

Results. The design of a pedestal crane with a lifting capacity of 250 tons on the pipe-laying vessel Seven Vega is considered. Experimental oscillograms have been obtained characterizing the operation of the crane main hook winch. The moment of trip (knockout due to overload) has been recorded at the maximum speed of one of the six drive electric motors. It has been established that such protection makes it impossible to continue lifting or lowering the load. The conducted studies have shown that for encoders used in a group crane electric drive, it is necessary to use the law of calculation of the rotation speed using the full duration of the pulse period of one channel. After changing the parameterization of the encoder signal processing map, which provides calculation of the rotation speed of each of the six electric motors, long-term tests have been carried out. The tests results have shown the proper operation of the crane main hook winch at maximum speeds.

Conclusions. The results of the conducted research make it possible to ensure high-quality operation of a group crane electric drive with frequency control. As a result of the study, it is established that when asymmetry of pulse duration is detected in the operation of optical encoders, it is necessary to change the speed calculation method of the frequency converter to use the full duration of the pulse period of one channel, and

not the difference between the fronts or drops of the pulses of four channels. The experience of the conducted research and repair and adjustment work can be used in various electrical complexes that use group electric drives with Siemens frequency converters.

Key words: electric power system, electric drive, frequency converter, oscillogram, cargo crane, encoder, pulse

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.059-069

Введение. Для выполнения грузовых операций на морских судах устанавливаются различные грузоподъемные механизмы, наиболее эффективными из которых являются грузовые краны [1, 2]. В зависимости от своего назначения, грузовые краны могут иметь различную конструкцию и грузоподъемность [3]. При этом количество электрических приводов, установленных на грузовых кранах, также может быть различным [4, 5]. Как правило, кран имеет электропривод механизма подъема груза, электропривод механизма изменения вылета стрелы, электропривод механизма поворота крана и может иметь электропривод механизма передвижения самого крана. Фирма Huisman (Голландия) проектирует, изготавливает и устанавливает уникальные грузовые краны на морские суда специального назначения [6, 7, 8]. Одним из таких судов является суперсовременное трубоукладочное судно *Seven Vega*, построенное в 2020 году, на котором установлен грузовой электрический главный кран Huisman грузоподъемностью 250 тонн.

Судно *Seven Vega* проектировалось и строилось с учетом последних достижений в области мирового морского судостроения для прокладки трубопроводов под водой [9]. Однако экипаж вынужден ремонтировать одни и те же узлы и механизмы [10, 11]. По информации с судна, 80 % поломок периодически повторяются. Как правило, после ремонта через 2–3 месяца, максимум через полгода неисправности возникают снова, несмотря на модификацию слабых мест. Обычно после ремонта и изменения конструкций на судне ресурс увеличивается с 2 до 4 месяцев. Многие узлы с неправильным расчетом прочности просто выламываются, после чего заказывается на верфи инженерный перерасчет. Инженеры производят перерасчет, признают ошибки при проектировании и вносят предложения по усилению механической прочности конструкции. После этого все изменения проходят согласования с Морским Регистром DNV. Но даже после мо-

дернизации некоторых механических узлов через полгода поломки возникают снова. Отмечены случаи, когда обоймы подшипников раскатываются так, что ролики вываливаются. Описанные ситуации возникают циклически в основном по механической части. Электротехнический комплекс отлажен и работает достаточно стабильно, но и в нем возникают проблемные ситуации.

На каждом оборудовании установлен свой блок ввода/вывода (remote input/output – RIO) Siemens и организована сеть с топологией кольца от центральных контроллеров через все оборудование. В результате при обрыве кабеля или выходе из строя коммутатора все продолжает работать, но при этом теряется резервирование. Рассмотрим ситуацию потери связи с коммутатором в блоке под водой, который зажимает и удерживает трубу. Очевидно, что доступ в место повреждения отсутствует. Если следовать топологии Siemens, то к коммутатору подсоединяются два оптических кабеля, образуя кольцевую схему подключения, в случае обрыва коммутатор изолирует один порт и разрывает кольцо. Но этот Scalence x204 умеет так разрывать только оптический порт. К коммутатору блока фиксации трубы подключен один кабель оптический, а другой – витая пара, которая только через четыре устройства конвертируется в оптический сигнал таким же коммутатором. Согласно инструкции, подключиться удаленно к коммутатору можно только через оптический порт. Но коммутатор его блокирует и возможность такого подключения отсутствует. Поднять конструкцию также невозможно: труба зажата, а разжать ее не получается, так как на этом устройстве потеряна связь с PLC. Для восстановления работоспособности необходимо резать трубу, крепить сваркой к ней оголовок, цеплять за лебедку и поднимать. Но на это требуется до 20 часов, чтобы достать ящик, найти отвалившийся коннектор, переобжать и перегрузить коммутатор.

После сообщения о происшествии производителю этого зажима выяснилось,

что их IT-инженер не знал, что зайти удаленно на этот тип коммутаторов можно только по оптическому порту.

Материалы и методы. Кран на пьедестале грузоподъемностью 250 тонн, разработанный для фирмы Royal IHC, предназначен для подъема грузов в море. Он может справиться с большим спектром задач. Кран стационарно установлен на корпусе судна.

Кран (рис. 1) имеет три подъемные системы для выполнения основных задач по подъему: два грузоподъемных устройства (поддерживающие лебедки) для помощи в стабилизации и позиционировании груза; систему поворота, обеспечивающую поворотное движение крана. Энергосистемы обеспечивают мощность, необходимую для работы. Кроме того, кран имеет несколько систем безопасности, способствующих безопасной эксплуатации крана. Кран управляется системой SCADA и PLC.

Лебедка главного гака крана Main Hoist – самая большая подъемная система. Ее можно использовать для глубоководных подъемов с морского дна. Главная лебедка также имеет активную компенсацию качки, чтобы минимизировать вертикальное перемещение груза в результате движения судна из-за волнового движения. Эта лебедка также оснащена режимом постоянно-

го натяжения (Constant Tension) для подъема с морского дна, автоматическим намотчиком, который направляет намотку троса на барабан. Барабан приводится в движение шестью комбинациями электродвигателя и редуктора (рис. 2), установленными на ведомой стороне лебедки. Шестерни на выходном валу двигателя входят в зацепление с зубчатым внутренним кольцом поворотного подшипника, приводя в движение барабан. Износ шестерен предотвращается системой смазки. Масло в каждом редукторе охлаждается воздушным маслоохладителем. Лебедка имеет три независимые тормозные системы:

1) динамическое торможение за счет рекуперативного режима электродвигателей;

2) суппортные тормоза, используемые в качестве стояночного тормоза (статического) и динамического тормоза в случае отключения системы или при отключении электроэнергии;

3) независимый суппортный тормоз для ручной системы защиты от перегрузки (MOPS) на двигателе.

Система малого гака Whip Hoist используется для выполнения бортовых и внешних подъемных операций, работает быстрее, чем лебедка главного гака.

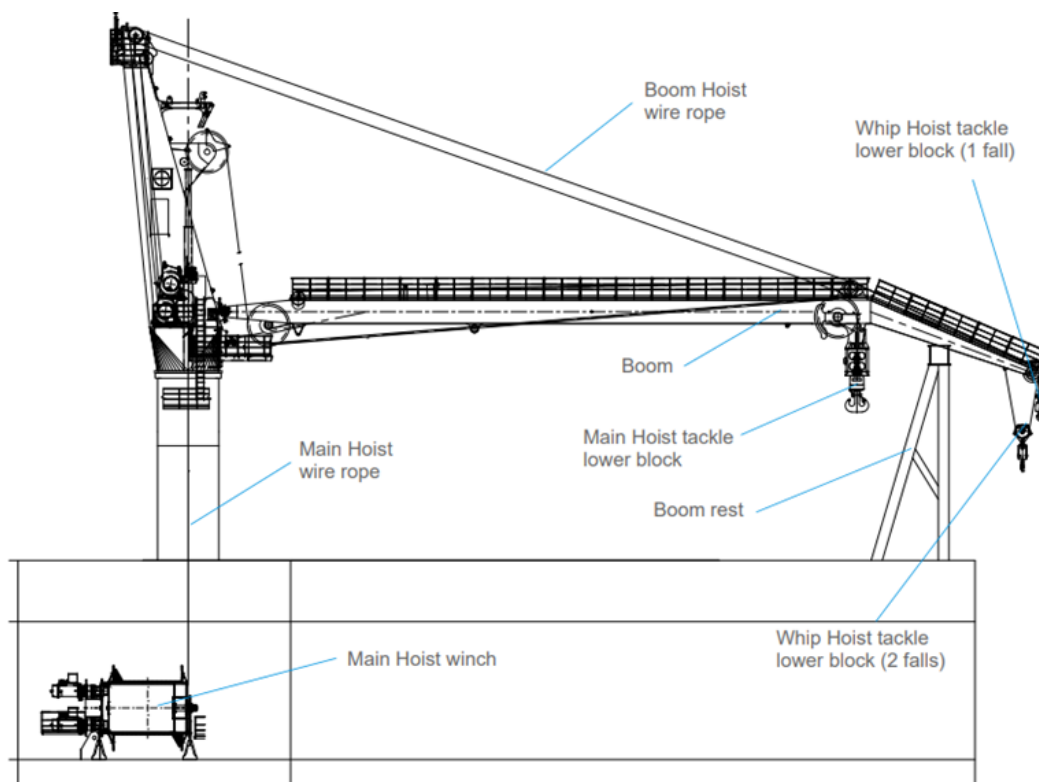


Рис. 1. Вид сбоку основных частей крана

Лебедка стрелы Boom Hoist используется для опускания и подъема стрелы для позиционирования грузов или самой стрелы.

Грузоподъемные устройства Load Tuggers используются для стабилизации груза в горизонтальной плоскости. Они также используются для небольшой регулировки положения груза в горизонтальной плоскости. Грузовые буксиры никогда не следует использовать для подъема грузов или персонала. Грузозахватные устройства имеют режим постоянного натяжения для автоматической стабилизации нагрузки.

Поворотная система обеспечивает поворотное движение, то есть вращение крановой башни относительно постаменты. Энергия для питания потребителей от постаменты к крану передается через кабели. В этом кране нет колец, просто по периметру внутри постаменты уложены кабели. Кран может поворачиваться на 225° как по часовой, так и против часовой стрелки. Поворот крана осуществляется четырьмя поворотными приводами.

Кран полностью оснащен электрическим приводом и использует частотно-регулируемые приводы для управления электродвигателями.

Распределение напряжения 930 В постоянного тока подает питание на основные электродвигатели, которые управляют всеми движениями крана.

Судно имеет два источника питания мощностью 1,5 МВт, 6,6 кВ переменного тока. Каждый из них питает независимую шину. Напряжение от судовых источников преобразуется в 690 В переменного тока с помощью трансформаторов. Это уменьшает частотные гармоники и таким образом повышает эффективность двигателей. Напряжение 690 В переменного тока, полученное от трансформаторов, преобразуется в напряжение 930 В постоянного тока с помощью двух 12-пульсных выпрямителей и затем подается на шину. Шина питает несколько преобразователей частоты (ПЧ). ПЧ преобразуют напряжение 930 В постоянного тока в напряжение 690 В переменного тока с частотным управлением, которое затем используется для управления электродвигателями. Каждый ПЧ управляет одним электродвигателем, за исключением приводов поворота, где каждый ПЧ управляет двумя электродвигателями.

Намоточное устройство главной лебедки приводится в действие отдельной гидравлической силовой установкой (HPU). Она также приводит в действие тормоза главной лебедки крана.

Кран управляется системой SCADA PLC. ПЛК получает оперативную информацию от датчиков и исполнительных механизмов на кране, таких как датчики для измерения нагрузки, датчики скорости, кулачковые переключатели с редуктором и переключатели провисания троса на лебедках.

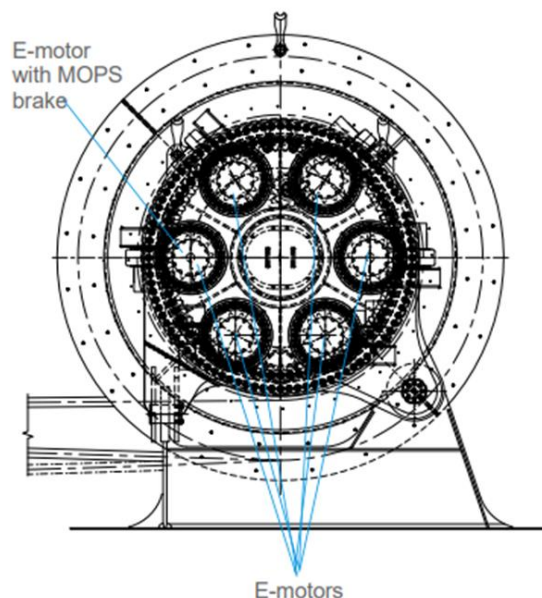


Рис. 2. Конструкция лебедки главного гака крана

Управление краном осуществляется с кресла оператора в кабине крана. Кресло оператора имеет две консоли. На консолях кресел расположены основные органы управления краном. Шкаф управления кабиной содержит общие органы управления, такие как управление стеклоочистителями и управление отоплением. Информация о работе и состоянии оборудования отображается на экране SCADA в кабине крана.

Кран имеет систему аварийной остановки. Кнопки аварийной остановки установлены в нескольких стратегически важных местах. Кран оснащен автоматической системой защиты от перегрузки (AOPS), которая использует заранее заданные кривые нагрузки для конкретных ситуаций подъема. Лебедки главного гака Main Hoist и малого гака Whip Hoist оснащены системой ручной защиты от перегрузки (MOPS), которая позволяет оператору вручную освободить груз при возникновении ситуации перегрузки. MOPS обычно использу-

ется в ситуациях перегрузки, связанных с дрейфом катеров снабжения во время их подъема в сочетании с неисправной подъемной системой. Превышение скорости и ускорения лебедок защищено цифровой независимой системой защиты скорости (DISPS). Все подъемные системы также оснащены системой защиты от передвижения. Система защиты от выбега использует кулачковые переключатели с редуктором, установленные на лебедках, и бесконтактные переключатели для определения положения. Система защиты от перегрева защищает компоненты крана от повреждений из-за перегрева.

С начала работы судна экипаж не может полноценно эксплуатировать кран на полной скорости, так как известно, что лебедка главного гака может неожиданно отключиться и возникнет аварийная ситуация. Испытания проводятся без груза, когда кран не участвует в технологических операциях. Шесть электромоторов мощностью по 400 кВт приводят в движение лебедку главного гака. Для управления установлено шесть индивидуальных частотных преобразователей по 800 кВт на каждый электродвигатель. При работе крана на полной скорости защита выключает один из шести моторов на лебедке. Во время наблюдений отмечено, что электромотор номер пять примерно раз в две недели отключается на полной скорости даже с пустым гаком. С пустым гаком нагрузка составляет примерно по 30 кВт на каждом электромоторе и случается момент, когда на пятом электромоторе она достигает 600–700 кВт и частотный преобразователь выбивает по высокому току.

Замена частотного преобразователя, электромотора, энкодера, кабеля на энкодер, карты энкодера, кабеля между ПЛК и частотным преобразователем и картой энкодера, кабеля на электромотор к улучшению ситуации не привела. Также сравнивались все параметры частотных преобразователей. Для исключения потери питания на карту энкодера и на питание контроллера частотного преобразователя устанавливался аккумулятор 24 В. Однако принятые меры не увенчались успехом.

Два года, пока кран был на гарантии, в каждом порту сервисный инженер пытался найти проблему. Ну вот уже год, как гарантии нет, электромеханическая служба судна пытается устранить эту неисправ-

ность. Очевидно, что проблема серьезная и требует проведения исследований.

Основным методом в проведении исследований является проведение пассивного эксперимента. Необходимо вести постоянный мониторинг работы частотного преобразователя при помощи его штатных возможностей и многоканального осциллографа. Использование штатных функций системы управления частотного преобразователя позволяет контролировать и получать осциллограммы одновременно шести параметров. Такими параметрами могут быть моменты двигателей, активные мощности двигателей, полный ток лебедки и обороты двигателей. Таким образом, проведение первого этапа исследований позволит получить достаточное количество информации, анализ которой позволит установить возможную причину отключения электродвигателя лебедки крана. Далее можно внести необходимые корректировки в программное обеспечение и настройки системы управления частотными преобразователями, проведя изменение параметризации карты обработки сигнала энкодера. После внесения изменений необходимо продолжить мониторинг работы крана для подтверждения успешности разработанных и внедренных мер и средств.

Результаты. В результате исследования установлено, что электродвигатель выбивает по обратной мощности. Если гак спускается и все электромоторы находятся в режиме генерации, то пятый электродвигатель переходит в режим двигателя. Если все электромоторы работают в режиме подъема, то пятый электродвигатель примерно раз в 2–3 недели переходит в режим генерации (рекуперации).

На рис. 3 и 4 представлены осциллограммы, на которых показаны графики момента на пятом электродвигателе 2, момента на четвертом электродвигателе 5, активной мощности пятого электродвигателя 4, активной мощности четвертого электродвигателя 6, полного тока лебедки 3, оборотов пятого электродвигателя 1.

На осциллограмме в режиме 1 (рис. 3) зафиксирован скачок по моменту пятого электродвигателя на графике 2, также наблюдается увеличение активной мощности пятого электродвигателя на графике 4 и полного тока лебедки на графике 3. На осциллограмме в режиме 2 (рис. 4) зафиксирован значительный, го-

раздо больший, чем на рис. 3, скачок по моменту пятого электродвигателя на графике 2, также наблюдаются значительные

увеличения активной мощности пятого электродвигателя на графике 4 и полного тока лебедки на графике 3.

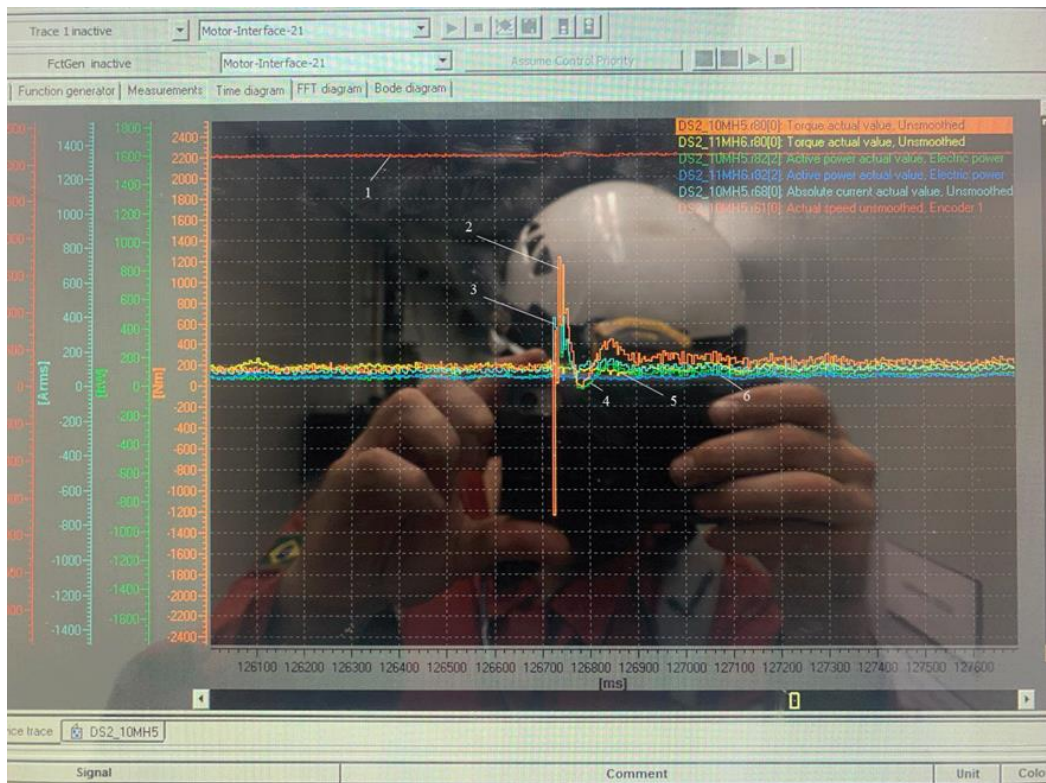


Рис. 3. Осциллограмма работы лебедки (режим 1)

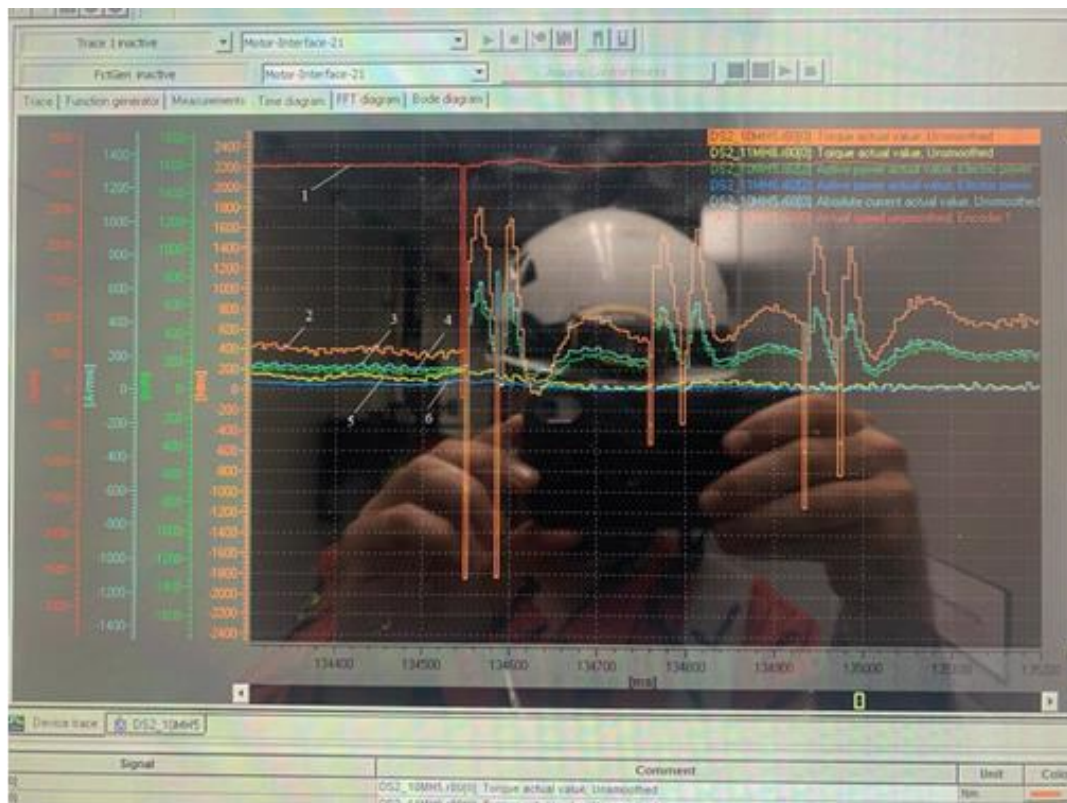


Рис. 4. Осциллограмма работы лебедки (режим 2)

Но самым интересным и важным является то, что на рис. 4 график сигнала оборотов с энкодера 1 имеет провал до нуля в момент, когда начинаются скачки момента, мощности и тока. Электродвигатель вращается со скоростью 3100 об/мин. Так как время выборки у графиков частотного преобразователя 4 мс, то, если событие меньше, его не видно (рис. 3). А на рис. 4 как раз удалось зафиксировать, когда график оборотов электродвигателя 1 за 4 мс падает с 3100 об/мин до нуля, а потом возвращается обратно. Вес лебедки главного гака крана 250 тонн, поэтому ее физически невозможно остановить за 4 мс: даже если тормоза механические и все 6 моторов весом по полторы тонны рекуперируют по 600 кВт каждый, она останавливается за 1,2 секунды. В результате наблюдений за работой крана также было установлено, что если работать на оборотах до 2900 об/мин, то электродвигатель никогда не выбивает (это событие происходит только на 3000 об/мин и выше).

Анализ графиков на осциллограммах частотного преобразователя показывает, что электродвигатель на 2–4 мс теряет сигнал с энкодера. В это время частотный преобразователь пытается его раскрутить сильнее и повышает частоту, ток растет и

двигатель выбивает. Таким образом, основным является вопрос о причине потери сигнала с энкодера. На рис. 5 представлена осциллограмма сигналов энкодера на карте частотного преобразователя. Все сигналы на четырех каналах одинаковые (с амплитудой 23 В), ноль смещен, чтоб не перекрывались графики.

Анализ осциллограмм (рис. 5) показывает, что стабильный ровный сигнал поступает со всех 4 каналов, а с момента отключения электродвигателя и до полного его останова длительность импульсов равномерно увеличивается.

На рис. 5 изображена осциллограмма для случая, когда четыре входа осциллографа подключены к четырем выходам А, А', В, В' инкрементного энкодера. В инкрементных энкодерах два выходных сигнала. По количеству импульсов на них определяется скорость, а по сдвигу фаз – направление вращения.

Инвертированный сигнал принципиально можно не использовать. Тогда в настройках выбирается, что энкодер не двухполярный и можно использовать два канала со сдвигом на 90 градусов. Недостаток двухканальных энкодеров – длина кабеля (при длине свыше 30 метров система не работает).



Рис. 5. Сигнал энкодера на карте частотного преобразователя: график 1 – канал А энкодера; график 3 – канал В энкодера; график 2 – канал А' инверсный к каналу А; график 4 – канал В' инверсный к каналу В

Частота импульсов на электромоторе, который вращается со скоростью 3000 об/мин и на котором установлен, например, энкодер с 2048 импульсами на оборот, будет составлять 100 кГц. В таком случае на выходе длинного кабеля на канале А будет много помех от канала В, и наоборот. Если же используется два противофазных канала А и А' (дифференциальных) и они идут по витой паре проводов, то их суммарное влияние на соседнюю витую пару В и В' очень мало (подавление 45–50 дБ). В итоге даже на 150-метровом кабеле снимается относительно чистый сигнал.

На рис. 6 приведены осциллограммы с марками времени, где канал С (график 4) – изменение шума на оплетке кабеля на чувствительности 500 мВ/дел. Оплетка отключена от земли, установлен резистор 1 кОм на землю, чтобы на приборе контролировать показания тока помех и наводок на оплетке кабеля энкодера. Во время переключения ключей энкодера зафиксированы помехи амплитудой 500 мВ, таким образом ток равен 0,5 мА.

На графиках, изображенных на рис. 5, можно заметить небольшую асимметрию: канал А (график 1) и канал А' (график 2) имеют разную длительность импульса. При рассмотрении сигнала 1 заметно, что длительность импульса больше длительности паузы, а они должны быть равны друг другу.

При рассмотрении осциллограмм на рис. 6 видно, что сначала идет фронт сигнала 1, затем следует фронт сигнала 3.

Между ними 2,4 масштабных единицы (или $2,4 \times 4 = 9,6$ мкс), что составляет $9,6 \text{ мкс} \times 4096 = 39,3$ мс на один оборот (или 1526 оборотов в минуту). Но после фронта сигнала 3 идет уже фронт сигнала 2 и между ними всего 1,8 масштабных единицы (или 7,2 мкс), что составляет $7,2 \times 4096 = 29,5$ мс на оборот (или 2033 оборотов в минуту). Из-за такой разницы контроллер частотного преобразователя «не знает», какое значение ему необходимо использовать для управления. Когда у энкодера такой несимметричный сигнал, нужно включать функцию расчета скорости по периоду импульсов одного канала.

В магнитном энкодере сигнал на выходе симметричный, а в оптическом – всегда есть небольшая асимметрия. Если эта асимметрия достигает 10 электрических градусов, то работа частотного преобразователя Siemens S120 не гарантируется, могут быть спорадические трипы, или скачки частоты.

Если все-таки используется оптический энкодер с несимметричным выходом, то нужно поменять метод расчета скорости частотным преобразователем, чтобы он использовал не фронт или спад импульсов, а весь период. То есть необходимо отключить эвальвацию по четырем фронтам и использовать один канал А. Это делает процесс управления в 4 раза медленнее, но при этом можно использовать несимметричный энкодер.



Рис. 6. Осциллограммы при измерении шума энкодера

Замена в параметре настройки р 437.4 частотного преобразователя ноля на единицу дала возможность работы пятому электромотору на полной скорости, но спустя полчаса теста выбило другой мотор. После этого была произведена замена на всех 6 частотных преобразователях в параметрах настройки р 437.4 нолей на единицы. Испытания лебедки главного гака крана в течение 10 часов на полной скорости не выявили больше никаких всплесков тока и отключений. Необходимо отметить, что вычисление скорости по четырем каналам актуально для работы в режимах позиционирования со скоростями менее 6 об/мин, но лебедка главного гака крана в таких режимах не выполняет никакие технологические операции. Коррекция по статизму для обеспечения быстродействия производится без фильтра, т. е. на каждом импульсе энкодера.

Выводы. Проведенные исследования позволили выявить и устранить чрезвычайно сложную причину неисправности в работе группового кранового электропривода на суперсовременном судне-трубоукладчике Seven Vega. Полученные результаты позволяют обеспечить качественную работу группового кранового электрического привода с частотным управлением во всех режимах эксплуатации. Опыт проведенных исследований и ремонтно-наладочных работ может быть использован в различных электротехнических комплексах, в которых используются групповые электрические приводы с частотными преобразователями Siemens. При возникновении подобных ситуаций можно рекомендовать начинать поиск неисправностей и проведение тестирования с получения осциллограмм управляющих сигналов частотных преобразователей и их анализа. При выявлении несимметрии длительности импульсов в работе оптических энкодеров необходимо поменять метод расчета скорости частотным преобразователем, где используется полная длительность периода импульса одного канала, а не разница между фронтами или спадами импульсов четырех каналов.

Список литературы

1. **Ship** unified electric-power systems / A.P. Sen'kov, B.F. Dmitriev, A.N. Kalmykov,

L.N. Tokarev // *Russian Electrical Engineering*. – 2017. – No. 88(5). – P. 253–258.

2. **Савенко А.Е., Савенко П.С.** Исследование работы мощного электропривода в автономном электротехническом комплексе // *Вестник ИГЭУ*. – 2017. – Вып. 4. – С. 44–49.

3. **Авербух М.А., Кузнецова А.Д.** Имитационное моделирование динамических процессов в крановом электроприводе с активным выпрямителем // *Интеллектуальная электротехника*. – 2021. – № 1(13). – С. 7–18.

4. **Пачина О.В., Федулеева В.А.** Компьютерная программа для расчета механизма подъема груза // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. – 2023. – № 2(56). – С. 58–62.

5. **Савельев С.В., Фисюренко Д.В.** Определение рациональных параметров грузоподъемных машин // *Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова*. – 2017. – № 3(20). – С. 41–44.

6. **Направления** совершенствования судовых единых электроэнергетических систем / Ю.А. Губанов, И.М. Калинин, А.С. Корнев и др. // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2019. – № 1–1(43). – С. 103–109.

7. **Geertsma R.D., Visser K., Negenborn R.R.** Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion // *Applied energy*. – 2018. – Vol. 228. – P. 2490–2509. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.080

8. **Авдеев Б.А.** Интеллектуальные энергоэффективные системы морских судов // *Вестник Керченского государственного морского технологического университета*. – 2021. – № 4. – С. 99–113.

9. **Савенко А.Е., Савенко П.С.** Обеспечение работы электротехнического комплекса современных судов специального назначения с динамическим позиционированием // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2021. – Т. 23, № 6. – С. 99–108.

10. **Савенко А.Е., Голубев А.Н.** Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах / *Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина*. – Иваново, 2016. – 172 с.

11. **A review** of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications / M.E. Mondejar, J.G. Andreasen, L. Pierobon, et al. // *Renewable & sustainable energy reviews*. – 2018. – Vol. 91. – P. 126–151.

References

1. Sen'kov, A.P., Dmitriev, B.F., Kalmykov, A.N., Tokarev, L.N. Ship unified electric-power systems. *Russian Electrical Engineering*, 2017, no. 88(5), pp. 253–258.

2. Savenko, A.E., Savenko, P.S. Issledovanie raboty moshchnogo elektroprivoda v

avtonomnom elektrotekhnicheskome komplekse [Research into powerful electric drives in the autonomous electrical power complex]. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 4, pp. 44–49.

3. Averbukh, M.A., Kuznetsova, A.D. Imitatsionnoe modelirovanie dinamicheskikh protsessov v kranovom elektroprivode s aktivnym vypryamitelem [Simulation of dynamic processes in crane electric drive with active rectifier]. *Intellektual'naya elektrotekhnika*, 2021, no. 1(13), pp. 7–18.

4. Pachina, O.V., Feduleeva, V.A. Komp'yuternaya programma dlya rascheta mekhanizma pod"ema gruzha [Computer program for calculating the lifting mechanism]. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*, 2023, no. 2(56), pp. 58–62.

5. Savel'ev, S.V., Fisyurenko, D.V. Opredelenie ratsional'nykh parametrov gruzopod"emnykh mashin [Determination of rational parameters of loading machines]. *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova*, 2017, no. 3(20), pp. 41–44.

6. Gubanov, Yu.A., Kalinin, I.M., Kornev, A.S., Kuznetsov, V.I., Sen'kov, A.P. Napravleniya sovershenstvovaniya sudovykh edinykh elektroenergeticheskikh sistem [Directions of improvement for ship unified power systems]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2019, no. 1–1(43), pp. 103–109.

7. Geertsma, R.D., Visser, K., Negenborn, R.R. Adaptive pitch control for ships with

diesel mechanical and hybrid propulsion. *Applied energy*, 2018, book 228, pp. 2490–2509. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.080.

8. Avdeev, B.A. Intellektual'nye energoefektivnye sistemy morskikh sudov [Intelligent energy-efficient systems of marine vessels]. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2021, no. 4, pp. 99–113.

9. Savenko, A.E., Savenko, P.S. Obespechenie raboty elektrotekhnicheskogo kompleksa sovremennykh sudov spetsial'nogo naznacheniya s dinamicheskim pozitsionirovaniem [Supporting the operation of the electrical power system of modern special purpose vessels with dynamic positioning]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2021, book 23, issue 6, pp. 99–108.

10. Savenko, A.E., Golubev, A.N. Obmen'nyye kolebaniya moshchnosti v sudovykh elektrotekhnicheskikh kompleksakh [Power exchange oscillations in ship electrotechnical complexes]. Ivanovo, 2016. 172 p.

11. Mondejar, M.E., Andreasen, J.G., Pierobon, L., Larsen, U., Thern, M., Haglind, F. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications. *Renewable & sustainable energy reviews*, 2018, book 91, pp. 126–151.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5.015.24

Анатолий Анатольевич Анисимов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры электроники и микропроцессорных систем, Россия, Иваново, e-mail: anis@emf.ispu.ru

Константин Евгеньевич Соколов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, старший преподаватель кафедры электроники и микропроцессорных систем, Россия, Иваново, e-mail: 616kost@mail.ru

Сергей Вячеславович Тарарыкин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры электроники и микропроцессорных систем, Россия, Иваново, e-mail: tsv@ispu.ru

Синтез параметрически грубых систем управления с регуляторами и наблюдателями состояния на основе грамианных технологий¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Системы автоматического управления, строящиеся на базе регуляторов с наблюдателями состояния, являются эффективными средствами управления линейными и линеаризованными объектами высокой степени сложности. Одной из ключевых проблем синтеза модальных систем является проблема создания параметрически грубых (робастных) систем, сохраняющих свою работоспособность и основные показатели качества при возможных вариациях параметров как объекта управления, так и самого регулятора.

Материалы и методы. Синтез робастной системы с наблюдателем состояния осуществляется методом модального управления на основе матричной модели объекта управления. Для обеспечения параметрической грубости системы предлагается методика, основанная на математическом аппарате грамианов управляемости и наблюдаемости, а также на преобразовании подобия матриц наблюдателя. Моделирование системы с регулятором и наблюдателем состояния проводится средствами комплекса MatLab.

Результаты. Предлагается метод формирования оптимальной с точки зрения параметрической грубости системы структуры наблюдателя состояния, в основу которого положена процедура преобразования подобия модели объекта, причем матрица преобразования формируется путем вариации сингулярных чисел грамианов управляемости и наблюдаемости.

Выводы. Предлагаемый метод позволяет получить структуру наблюдателя с определенным соотношением управляемости и наблюдаемости, обеспечивающую выполнение условия параметрической грубости – отсутствие положительных обратных связей в составе управляющего устройства. Полу-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ №075-03-2023-025 (1/23).

The study is carried out within the framework of the Government Contract of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 075-03-2023-025 (1/23).

ченные результаты позволяют наглядно показать высокую эффективность использования грамианного метода для синтеза систем управления с наблюдателями состояния с низкой чувствительностью к вариациям собственных параметров.

Ключевые слова: наблюдатель состояния, регулятор состояния, грамианный метод, робастная система управления

Anatoly Anatolievich Anisimov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Electronics and Microprocessor Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: anis@emf.ispu.ru

Konstantin Evgenievich Sokolov

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Senior Lecturer of Electronics and Microprocessor Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: 616kost@mail.ru

Sergey Vyacheslavovich Tararykin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Electronics and Microprocessor Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tsv@ispu.ru

Synthesis of parametrically rough control systems with regulators and state observers based on Gramian technologies

Abstract

Background. Automatic control systems based on regulators with state observers are effective means to control linear and linearized objects of a high degree of complexity. One of the key problems in the synthesis of modal systems is the development of parametrically rough (robust) systems that retain their performance, as well as the main quality indicators with possible variations of the parameters of both the control object and the controller itself.

Materials and methods. The synthesis of a robust system with a state observer is carried out by the modal control method based on the matrix model of the controlled object. To ensure the parametric robustness of the system, the authors have proposed a technique which based on the mathematical apparatus of Gramians of controllability and observability as well as on the similarity transformation of observer matrices. Computer simulation of the system with state controller and observer is carried out by means of the MatLab software.

Results. The authors have proposed a method to form an observer state structure that is optimal in the sense of parametric roughness of the system, which is based on the procedure of transforming the similarity of the object model. And the transformation matrix is formed by varying the singular numbers of the controllability and observability gramians.

Conclusions. The proposed method allows us to obtain an observer structure with a certain ratio of controllability and observability that ensures the fulfillment of the condition of parametric roughness i.e., the absence of positive feedback in the control device. The results obtained make it possible to clearly demonstrate the high efficiency of using the Gramian method for the synthesis of control systems with state observers with low sensitivity to variations of the controller own parameters.

Key words: state observer, state controller, gramian method, robust control system

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.070-081

Введение. Системы автоматического управления (САУ), строящиеся на базе регуляторов с наблюдателями состояния (РНС), являются эффективными средствами управления линейными и линеаризованными объектами высокой степени сложности [1, 2].

Структурная реализация САУ с РНС (рис. 1) основывается на принципе управления состоянием наблюдателя, подстраиваемого под переменные состояния реального объекта на основе информации от измерителя его выходной координаты.

В итоге РНС приобретает свойства регуляторов состояния (РС) и регуляторов «входа-выхода», получая в сравнении с ними дополнительные степени свободы управления в виде структурной реализации и значений параметров наблюдателя.

Одной из ключевых в теории и практике САУ, в том числе САУ с РНС, является проблема создания параметрически грубых (робастных) систем, сохраняющих свою работоспособность и основные показатели качества при возможных вариациях внутренних параметров [3–5].

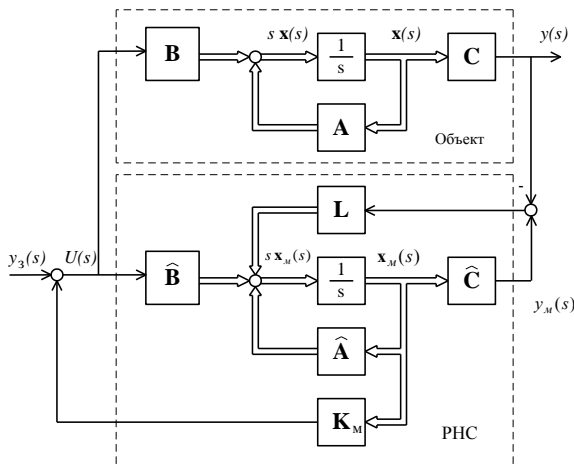


Рис. 1. Структурная схема системы автоматического управления с РНС

Несмотря на значительные успехи в этой области, универсальных методов синтеза робастных САУ, гарантированно приводящих к желаемому результату, пока не разработано, что делает актуальным продолжение исследований в этом направлении.

Как показано в [6–8], значительные потенциальные возможности повышения робастных свойств линейных САУ содержатся в классическом модальном управлении, реализуемом регуляторами состояния и регуляторами «входа-выхода».

Применительно к САУ с РНС в [8] показано, что снижение их чувствительности к вариациям параметров объекта управления достигается формированием такого темпа процессов управления (распределения полюсов), при котором сохраняется минимально-фазовый характер передаточной функции РНС.

Не менее важной является проблема обеспечения низкой чувствительности САУ к вариациям собственных параметров РНС. Она сохраняет свою актуальность даже при цифровой реализации управляющего устройства [9], поскольку ограничения разрядной сетки вычислителя, квантование сигналов по времени и по уровню при возможных колебаниях такта квантования могут существенно ухудшать показатели качества параметрически негрубой САУ.

При этом низкая чувствительность системы (рис. 1) к вариациям собственных параметров РНС может достигаться определенным выбором структуры и формированием темпа подстройки наблюдателя, при которых обеспечивается отсутствие положительных обратных связей (ОС) как в основном

контуре управления (матрица K_m), так и в контуре подстройки наблюдателя (матрица L) [8].

Это объясняется тем, что появление положительной ОС в контуре управления приводит к дополнительному отрицательному фазовому сдвигу сигналов, аналогичному таковому при введении двойного интегрирования. Стремление обеспечить заданные требования качества в этих условиях приводит к «острой» настройке регулятора, что обуславливает высокую чувствительности САУ к вариациям внутренних параметров.

Традиционно применяемые для реализации РНС структуры, соответствующие каноническим формам наблюдаемости (КФН) и управляемости (КФУ), оказываются в этом смысле наименее эффективными, поскольку по мере повышения степени вырождения объекта для наблюдателя в КФН теряется управляемость, а для наблюдателя в КФУ – наблюдаемость. Как следствие, элементы матрицы K_m регулятора и матрицы L подстройки наблюдателя (см. рис. 1) могут принимать положительные значения, формируя дестабилизирующие ОС в собственной структуре РНС и снижая робастные свойства САУ.

Более рациональной для обеспечения условий робастности оказывается реализация наблюдателя в форме объекта управления, обладающей, как правило, более благоприятным сочетанием свойств управляемости и наблюдаемости [8].

Однако очевидно, что для объектов, приближающихся по своей структуре и свойствам к КФУ или КФН (с доминированием управляемости или наблюдаемости), эта форма представления наблюдателя не будет давать существенных преимуществ в решении проблемы параметрической грубости САУ.

В этих условиях становится актуальным поиск других, более рациональных в отношении собственной параметрической грубости форм структурного представления наблюдателя состояния (НС), а также разработка соответствующих методов получения таких форм.

Возможным путем решения проблемы структурного синтеза РНС является применение грамианных технологий [10–13], позволяющих проводить эквивалентные преобразования координатного базиса и обычно применяемых для получения сбалансированной формы представления объекта [14] с одинаковой степенью управ-

ляемости и наблюдаемости в целях дальнейшего редуцирования его расчетной модели при синтезе регулятора [15].

Как известно, грамиан управляемости характеризует распределение энергии входного воздействия по координатам состояния объекта, а грамиан наблюдаемости определяет соответствующий вклад координат состояния в энергию выходного сигнала объекта.

Такая «физическая» трактовка дает основание полагать, что при существенном различии основного темпа управления САУ и темпа подстройки НС, обеспечивающем реализацию принципа «разделения движений», сбалансированная форма представления наблюдателя (СБФ), характеризующаяся равной степенью управляемости и наблюдаемости, не будет самой эффективной в решении проблемы параметрической грубости.

Тем не менее применяемые грамианные методы эквивалентных преобразований координатного базиса объекта управления вполне могут использоваться при организации поиска более рациональных форм представления НС в структурно-параметрическом синтезе робастных САУ.

Ниже предлагается метод формирования оптимальной структуры наблюдателя, основанный на сингулярном разложении грамианов и позволяющий сформировать модель объекта (структуру НС) с определенным соотношением управляемости и наблюдаемости, обеспечивающим отсутствие положительных ОС в составе управляющего устройства и улучшение робастных свойств САУ.

Постановка задачи исследования.

Будем рассматривать варианты одноканальных систем управления с РНС, имеющие общую векторно-матричную структуру (см. рис. 1, где s – переменная Лапласа; y_z, y, y_m – входной и выходные сигналы объекта и наблюдателя; U – управляющее воздействие на объект; x и x_m – векторы координат состояния объекта и асимптотического наблюдателя; A и \hat{A} , B и \hat{B} , C и \hat{C} – матрицы состояния, входа, выхода объекта и наблюдателя размерностями $n \times n$, $n \times 1$, $1 \times n$, n – порядок объекта).

Передаточная функция (ПФ) объекта, представленного в векторно-матричной форме, по каналу управления имеет вид

$$H_o(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = C(Is - A)^{-1}B = \frac{b_ms^m + \dots + b_1s + b_0}{s^n + \dots + a_1s + a_0},$$

где I – единичная матрица; $n = \deg A(s)$ и $m = \deg B(s)$ – степени полиномов знаменателя и числителя ПФ, $A(s)$ и $B(s)$ соответственно.

Ограничимся исследованием особенностей робастного управления *невыврожденными минимально-фазовыми объектами*.

Будем осуществлять синтез робастной системы с РНС методами модального управления [1, 2]. Вычисление матрицы регулятора K_m при этом выполняется на основе желаемого характеристического полинома $D(s) = s^n + d_{n-1}s^{n-1} + \dots + d_1s + d_0$:

$$K_m = \bar{K}_m \bar{U} \hat{U}^{-1}; \quad (1)$$

$$\bar{K}_m = [a_0 - d_0, a_1 - d_1, \dots, a_{n-1} - d_{n-1}],$$

где $\bar{U} = [\bar{B} \quad \bar{A}\bar{B} \quad \bar{A}^2\bar{B} \quad \dots \quad \bar{A}^{n-1}\bar{B}]$ и $\hat{U} = [\hat{B} \quad \hat{A}\hat{B} \quad \hat{A}^2\hat{B} \quad \dots \quad \hat{A}^{n-1}\hat{B}]$ – матрицы управляемости в КФУ и в собственных координатах НС.

Вычисление матрицы подстройки L выполняется на основе желаемого полинома $D^*(s) = s^n + d_{n-1}^*s^{n-1} + \dots + d_1^*s + d_0^*$:

$$L = \tilde{L} \tilde{V} \hat{V}^{-1}; \quad \tilde{L} = [a_0 - d_0^*, a_1 - d_1^*, \dots, a_{n-1} - d_{n-1}^*], \quad (2)$$

где $\tilde{V} = [\tilde{C}^T \quad (\tilde{C}\tilde{A})^T \quad (\tilde{C}\tilde{A}^2)^T \quad \dots \quad (\tilde{C}\tilde{A}^{n-1})^T]$ и $\hat{V} = [\hat{C}^T \quad (\hat{C}\hat{A})^T \quad (\hat{C}\hat{A}^2)^T \quad \dots \quad (\hat{C}\hat{A}^{n-1})^T]$ – матрицы наблюдаемости в КФН и в собственных координатах НС.

Значения среднегеометрических корней (СГК) полиномов $D(s)$ и $D^*(s)$ $\Omega_0 = \sqrt[n]{d_0}$ и

$\Omega_n = \sqrt[n]{d_0^*}$ соответственно выбираются исходя из требований быстродействия и разделения движений в пределах области параметрической грубости САУ с регулятором «входа-выхода» [8].

Поставим задачу формирования рациональной структуры и определения параметров РНС, которые исключают появление положительных элементов матриц K_m и L при выбранных выражениях полиномов $D(s)$ и $D^*(s)$ и заданном быстродействии САУ.

Решение задачи будем искать как преобразование координат состояния мо-

дели объекта управления, обеспечивающее необходимое соотношение управляемости и наблюдаемости. В этом случае рациональная структура наблюдателя состояния формируется путем преобразования подобия координатного базиса объекта с использованием матрицы преобразования, для отыскания которой используется математический аппарат грамианов управляемости и наблюдаемости.

Для иллюстрации результатов исследования будем использовать мехатронный объект управления (ОУ1) с доминированием свойств управляемости. Расчетную часть работы будем выполнять средствами программного комплекса MatLab.

Анализ системных свойств объекта с использованием грамианов и матричных норм. Для решения поставленной задачи предлагается использовать математический аппарат грамианов управляемости \mathbf{G}_c и наблюдаемости \mathbf{G}_o [10–13] объекта управления, которые определяются выражениями:

$$\mathbf{G}_c = \int_0^{\infty} e^{\mathbf{A}^T t} \mathbf{B} \mathbf{B}^T e^{\mathbf{A} t} dt;$$

$$\mathbf{G}_o = \int_0^{\infty} e^{\mathbf{A}^T t} \mathbf{C}^T \mathbf{C} e^{\mathbf{A} t} dt,$$

где t – переменная времени.

Для одномерного объекта грамианы представляют собой матрицы размерностью $n \times n$.

Анализ грамианов позволяет судить об управляемости, наблюдаемости и вырожденности объекта, представленного в векторно-матричной форме. Для этого используется процедура сингулярного разложения, приводящая грамианы одномерного объекта к виду

$$\mathbf{G}_c = \mathbf{U}_c \mathbf{\Sigma}_c \mathbf{U}_c^T; \quad \mathbf{G}_o = \mathbf{V}_o \mathbf{\Sigma}_o \mathbf{V}_o^T,$$

где $\mathbf{\Sigma}_c$, $\mathbf{\Sigma}_o$ – диагональные матрицы, состоящие из сингулярных чисел грамианов управляемости и наблюдаемости, выстроенных в порядке убывания; \mathbf{U}_c и \mathbf{V}_o – матрицы преобразования грамианов к диагональной форме.

Относительно малые значения сингулярных чисел грамианов являются признаками плохой управляемости или плохой наблюдаемости определенных координат состояния объекта. Равенство нулю одного из них свидетельствует о вырождении ПФ с

потерей соответственно управляемости при $\sigma_{cn} = 0$ или наблюдаемости при $\sigma_{on} = 0$. Поэтому наименьшие значения сингулярных чисел грамианов могут использоваться для количественной оценки управляемости, наблюдаемости и вырожденности объекта или его модели [12, 13].

В качестве альтернативной оценки степени управляемости и наблюдаемости объекта и его модели (наблюдателя) бывает удобнее использовать нормы матриц преобразования координат [7, 8]:

$$\|\mathbf{P}_U\|_1 = \max_{1 \leq j \leq n} \left(\sum_{i=1}^n |u_{ij}| \right) \quad \text{и} \quad \|\mathbf{P}_V\|_1 = \max_{1 \leq j \leq n} \left(\sum_{i=1}^n |v_{ij}| \right),$$

где u_{ij} , v_{ij} – элементы матриц \mathbf{P}_U и \mathbf{P}_V соответственно, находящиеся на пересечении строки i и столбца j ; $\mathbf{P}_U = \bar{\mathbf{U}} \cdot \mathbf{U}^{-1}$; $\mathbf{P}_V = \tilde{\mathbf{V}} \cdot \mathbf{V}^{-1}$.

Преимущество этих показателей заключается в том, что по мере приближения объекта к КФУ и КФН соответствующие значения матричных норм $\|\mathbf{P}_U\|_1$ и $\|\mathbf{P}_V\|_1$ стремятся к единице. Потеря указанных системных свойств сопровождается неограниченным возрастанием соответствующих матричных норм. Все это позволяет повысить точность сравнительной оценки системных свойств объекта управления.

Для наглядной иллюстрации возможностей достижения робастных свойств САУ при различных структурных реализациях РНС будем использовать графики зависимостей элементов матриц $\mathbf{K}_m = [k_1, k_2, \dots, k_n]$ и $\mathbf{L} = [l_1, l_2, \dots, l_n]$ от Ω_o и Ω_n СГК полиномов $D(s)$ и $D^*(s)$ соответственно [7, 8]. При этом штриховкой будут обозначаться области робастности, в пределах которых все элементы матриц принимают отрицательные значения. Эти зависимости формируются путем многократного выполнения процедур синтеза РНС для заданной модели объекта при вариациях Ω_o и Ω_n в пределах значений, соответствующих требованиям быстрого действия САУ.

Применение грамианных технологий в задачах редукции динамических моделей приводит к их представлению в СбФ, для которой грамианы управляемости и наблюдаемости являются диагональными и совпадают. Матрицы управляемости и наблюдаемости объекта в такой форме, а следовательно, и элементы матриц \mathbf{K}_m и \mathbf{L} при одинаковых полиномах $D(s)$ и $D^*(s)$, совпадают с точностью до знака. Однако общая зона робастности контуров управления и подстройки

НС для подобной структуры может оказаться достаточно узкой или отсутствовать.

Помимо решения задач системного анализа, редуцирования моделей и других, применение грамианных технологий может составить основу для формирования моделей объектов с требуемым соотношением управляемости и наблюдаемости путем вариации сингулярных чисел грамианов и последующего преобразования координатного базиса.

Формирование оптимальной структуры наблюдателя состояния с использованием грамианных технологий. Основная идея заключается в следующем: для объекта с преобладающим свойством управляемости, т.е. близкого к КФУ, принудительно увеличивают минимальное значение (минимальные значения) грамиана наблюдаемости Σ_o , а для объекта с преобладающим свойством наблюдаемости, т.е. близкого к КФН, выполняют аналогичные действия в отношении грамиана управляемости Σ_c .

Эквивалентность исходной и преобразованной моделей объекта при таком подходе обеспечивается за счет неособого преобразования подобия с использованием матрицы T :

$$\hat{A} = T^{-1}AT; \quad \hat{B} = T^{-1}B; \quad \hat{C} = CT, \quad (3)$$

где $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}$ – матрицы состояния, входа и выхода объекта в преобразованных координатах.

При этом матрица преобразования координат T должна отвечать условию идентичности передаточных функций исходной и преобразованной моделей [10]:

$$\hat{G}_c = T^{-1}G_cT^{-T}; \quad \hat{G}_o = T^{-1}G_oT^{-T}. \quad (4)$$

На основе первого уравнения (4), а также выражений сингулярного разложения грамианов управляемости одномерного объекта в исходной $G_c = U_c \Sigma_c U_c^T$ и преобразованной $\hat{G}_c = \hat{U}_c \hat{\Sigma}_c \hat{U}_c^T$ системе координат можно получить выражения для определения матрицы преобразования T : $T^{-1}U_c \Sigma_c U_c^T T^{-T} = \hat{U}_c \hat{\Sigma}_c \hat{U}_c^T$, откуда следует $T = U_c \Sigma_c^{1/2} \hat{\Sigma}_c^{-1/2} \hat{U}_c^{-1}$.

При вычислении матрицы T появляется «лишняя» степень свободы в задании матрицы \hat{U}_c , поскольку в дальнейших расчетах форма грамиана \hat{G}_c не используется. Исходя из того что большинство сингу-

лярных чисел грамианов исходной модели ОУ при корректировке сохраняются неизменными, принимаем $\hat{U}_c = U_c$.

Аналогичным образом, матрицу преобразования можно определить на основе второго уравнения (4) и выражений сингулярного разложения грамианов наблюдаемости объекта $G_o = V_o \Sigma_o V_o^T$ и $\hat{G}_o = \hat{V}_o \hat{\Sigma}_o \hat{V}_o^T$:

$$T^T V_o \Sigma_o V_o^T T = \hat{V}_o \hat{\Sigma}_o \hat{V}_o^T;$$

$$T = V_o^{-T} \Sigma_o^{-1/2} \hat{\Sigma}_o^{1/2} \hat{V}_o^T,$$

где принимаем $\hat{V}_o = V_o$.

По новым выражениям матриц (3) преобразованной модели объекта определяются сингулярные числа другого грамиана, выполняется расчет параметров регулятора (матрица K_m) и параметров подстройки наблюдателя состояния (матрица L) по формулам (1) и (2) соответственно, после чего оценивается характер обратных связей во всех контурах РНС.

Предложенные структурные преобразования позволяют изменять в нужном направлении сингулярные числа обоих грамианов, достигая нового соотношения свойств управляемости и наблюдаемости модели объекта, предназначенной для реализации НС, и формировать более благоприятную конфигурацию областей параметрической грубости системы управления.

Поскольку аналитически определить связь между значениями сингулярных чисел грамианов модели объекта и областями параметрической грубости системы с РНС затруднительно, предлагается итерационная процедура формирования структуры наблюдателя, алгоритм которой поясняет блок-схема на рис. 2.

На начальном этапе (блок 1) формируют исходное матричное описание объекта (матрицы параметров A, B, C), определяют передаточную функцию $H_o(s)$ и задают требования к качеству САУ, синтезируемой методами модального управления, в виде выражений полиномов $D(s)$, $D^*(s)$ и соответствующих значений их СГК Ω_o и Ω_n .

Затем (блок 2) вычисляют грамианы G_c, G_o и выполняют их сингулярное разложение, получая соответствующие диагональные формы Σ_c, Σ_o . Для более точной оценки управляемости, наблюдаемости и вырожденности рассчитывают матричные нормы $\|P_u\|_1, \|P_v\|_1$ и $\|P_{vu}\|_1 = \|P_{vv}\|_1$, используя при матричном представлении

объекта в КФУ и КФН значения коэффициентов полиномов ПФ $H_0(s)$.

После этого (блок 3) выполняют расчет параметров регулятора (матрица \mathbf{K}_M) и контуров подстройки наблюдателя (матрица \mathbf{L}) и анализируют (блок 4) наличие положительных ОС в структуре РНС.

При получении отрицательно определенных матриц \mathbf{K}_M и \mathbf{L} задача синтеза робастной САУ считается решенной и вычисленные значения параметров РНС исполь-

зуют для практической реализации управления (блок 5).

При наличии положительных ОС в структуре РНС переходят к корректировке координатного базиса модели объекта управления грамианными методами.

Для этого (блок 6) сравнением матричных норм $\|\mathbf{P}_U\|_1$ и $\|\mathbf{P}_V\|_1$ сначала оценивают степень близости объекта к КФУ и КФН, выявляя доминирование управляемости или наблюдаемости.

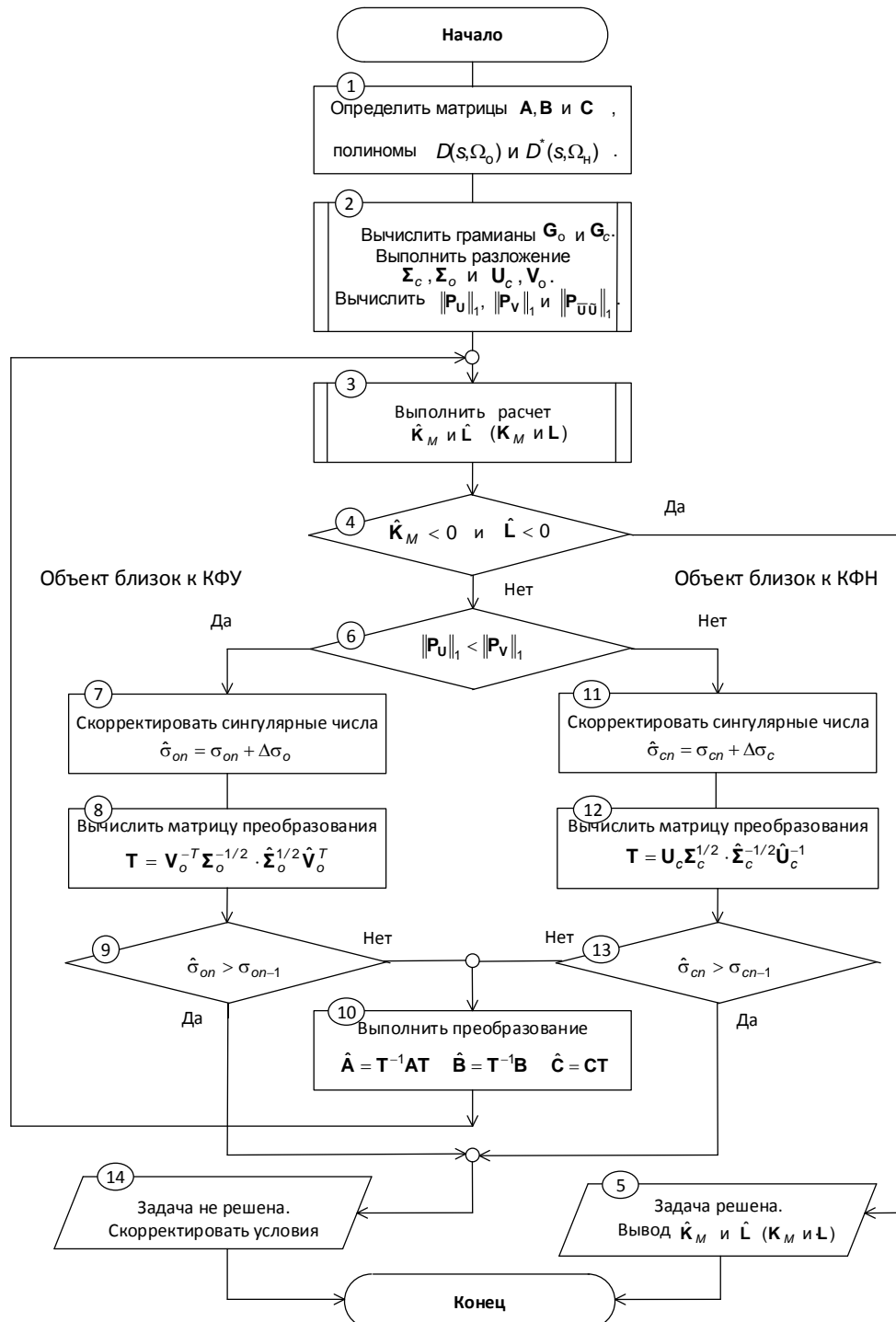


Рис. 2. Алгоритм структурного синтеза наблюдателя состояний

При доминировании управляемости принудительно увеличивают на величину шага $\Delta\sigma_0$ минимальное сингулярное число σ_{0n} грамиана наблюдаемости (блок 7) в пределах установленного ограничения σ_{0n-1} . Рассчитывают (блок 8) соответствующую матрицу T преобразования исходной структуры объекта к новому координатному базису. При отсутствии выхода корректируемого сингулярного числа за установленный предел (блок 9) выполняют преобразование координатного базиса объекта (блок 10) и проводят повторный расчет параметров регулятора и наблюдателя (блок 3) для новой модели с последующим анализом (блок 4) характера обратных связей полученного РНС.

При достижении отрицательной определенности матриц \hat{K}_M и \hat{L} задача считается решенной (блок 5), а при сохранении положительных элементов матриц выполняется следующий шаг сингулярной корректировки и получение новой модели объекта для реализации НС (блоки 7–10).

При близости исходного объекта к КФН (доминировании свойства наблюдаемости) выполняют (блоки 11–13, 10) аналогичные итерационные процедуры корректировки (повышения) минимальных сингулярных чисел грамиана управляемости σ_{cn} в пределах установленного ограничения σ_{cn-1} и формирования нового структурного представления НС с требуемым сочетанием системных свойств. Следует отметить, что приведенный алгоритм соответствует объектам с одной точкой вырождения (сингулярностью), при которой выделяется и корректируется лишь одно минимальное сингулярное число. Однако в том же виде он может использоваться и для объектов с несколькими сингулярностями, если при корректировке (блоки 7, 11) одновременно из-

менять соответствующее количество минимальных сингулярных чисел.

Для автоматизации вычислительных процедур в соответствии с разработанным алгоритмом был разработан программный комплекс GRAMMIAN2 [Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023664270].

Приведем конкретный числовой пример формирования робастного РНС при синтезе систем управления мехатронным объектом ОУ1, обладающим доминирующими свойствами управляемости.

Синтез робастной системы управления мехатронным объектом с РНС грамианным методом. Рассмотрим синтез робастной системы с РНС для мехатронного объекта управления (ОУ1), структурная схема которого приведена на рис. 3, в соответствии с предложенным алгоритмом.

Полученное векторно-матричное описание ОУ (блок 1) имеет вид:

$$A = \begin{bmatrix} -9,091 & -0,074 & 0 & 0 \\ 66,667 & -5,0 & -66,667 & 5,0 \\ 0 & 0,65 & 0 & -0,65 \\ 0 & 0,3 & 4,0 & -0,3 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0,462 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C = [0 \ 0 \ 0 \ 1].$$

Примем в качестве желаемых $D(s)$ и $D^*(s)$ синтезируемой системы полиномы Ньютона 4-го порядка при значениях $\Omega_0 = 15 \text{ с}^{-1}$ и $\Omega_H = 30 \text{ с}^{-1}$, отвечающих заданным требованиям быстродействия и разделения темпов движений.

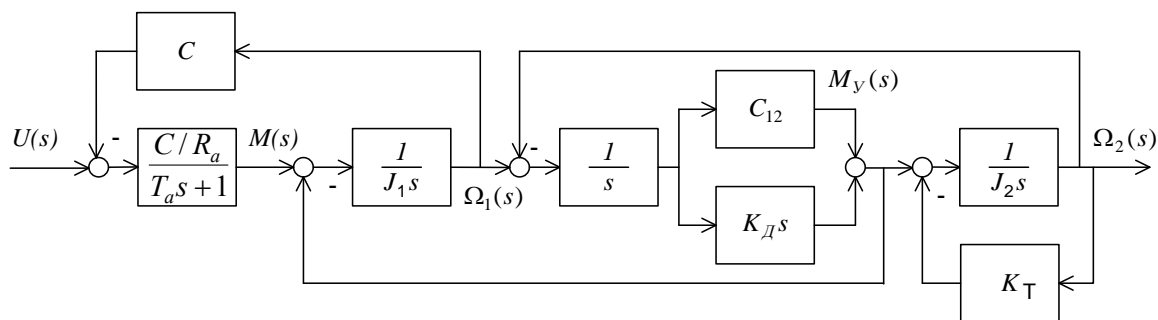


Рис. 3. Структурная схема мехатронного объекта управления (ОУ1): U — управляющее воздействие; M , M_y — электромагнитный момент и момент упругости; Ω_1 , Ω_2 — угловые скорости 1-й и 2-й масс; $C = 0,16 \text{ Вб}$ — конструктивный параметр двигателя; $T_a = 0,11 \text{ с}$, $R_a = 3,15 \text{ Ом}$ — постоянная времени и сопротивление якорной цепи; $J_1 = 0,015 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_2 = 0,25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ — моменты инерции 1-й и 2-й масс; $C_{12} = 0,65 \text{ Н} \cdot \text{м}$ — коэффициент жесткости; $K_d = 0,075 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ — коэффициент трения

Процедуры вычисления грамианов управляемости и наблюдаемости $gram()$ с последующим сингулярным разложением $svd()$ для ОУ1 (блок 2) дают следующие результаты:

$$\Sigma_c = \text{diag}\{1,39 \ 0,2066 \ 1,0334 \cdot 10^{-2} \ 4,849 \cdot 10^{-3}\};$$

$$\Sigma_o = \text{diag}\{17,46 \ 3,73 \cdot 10^{-2} \ 1,046 \cdot 10^{-2} \ 3,66 \cdot 10^{-9}\}.$$

Соответствующие диаграммы распределения сингулярных чисел грамианов приведены на рис. 4,а.

Значения норм матриц преобразования координат для ОУ1 составляют $\|P_u\|_1 = 2,351$ и $\|P_v\|_1 = 1884,9$.

Зависимости параметров РНС в форме объекта от значений $\Omega_o = \text{var}$ и $\Omega_n = \text{var}$ для ОУ1 приведены на рис. 5,а. Объект близок по структуре к КФУ, о чем свидетельствуют широкие зоны отрицательных значений элементов матриц K_m при узких областях отрицательных значений элементов L .

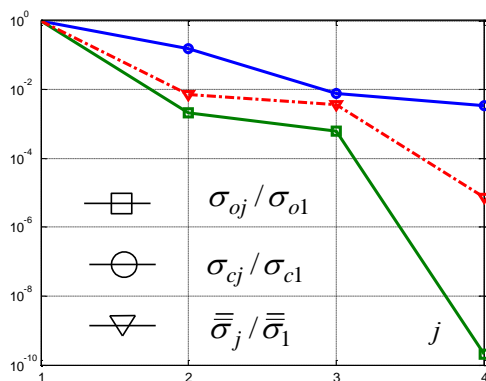
Матрицы K_m и L для наблюдателя в форме объекта, полученные при заданных значениях СГК (блок 3) и приведенные в таблице, не удовлетворяют условиям параметрической грубости (блок 4).

В соответствии с условием $\|P_u\|_1 < \|P_v\|_1$ (блок 6) выполняется коррекция сингулярных чисел грамиана наблюдаемости (блок 7):

$$\Sigma_o = \text{diag}\{17,46 \ 3,727 \cdot 10^{-2} \ 1,046 \cdot 10^{-2} \ 3,665 \cdot 10^{-8}\},$$

после чего вычисляется матрица преобразования координат (блок 8):

$$T = \begin{bmatrix} 1,035 & -0,2713 & 2,068 \cdot 10^{-2} & -6,238 \cdot 10^{-5} \\ -0,2713 & 3,115 & -0,1613 & 5,339 \cdot 10^{-4} \\ 2,068 \cdot 10^{-2} & -0,1613 & 1,012 & -3,509 \cdot 10^{-5} \\ -6,238 \cdot 10^{-5} & 5,339 \cdot 10^{-4} & -3,509 \cdot 10^{-5} & 1,0 \end{bmatrix}.$$



а)

В результате для преобразованных матриц \hat{A} , \hat{B} , и \hat{C} (блок 10) получаем следующие значения матриц РНС (блок 3):

$$\hat{K}_m = [-90,86 \ -30,42 \ -2,57 \cdot 10^2 \ -5,99 \cdot 10^2];$$

$$\hat{L} = [-2,607 \cdot 10^4 \ 1,714 \cdot 10^5 \ -1,334 \cdot 10^4 \ -1,992 \cdot 10^2].$$

Полученные значения по-прежнему не удовлетворяют условиям параметрической грубости системы с РНС (блок 4).

В результате циклических повторений предложенной процедуры были получены следующие значения сингулярных чисел грамианов управляемости и наблюдаемости:

$$\hat{\Sigma}_c = \text{diag}\{0,6137 \ 3,188 \cdot 10^{-2} \ 5,233 \cdot 10^{-3} \ 1,105 \cdot 10^{-7}\};$$

$$\hat{\Sigma}_o = \text{diag}\{17,460 \ 3,727 \cdot 10^{-2} \ 1,046 \cdot 10^{-2} \ 4,665 \cdot 10^{-3}\},$$

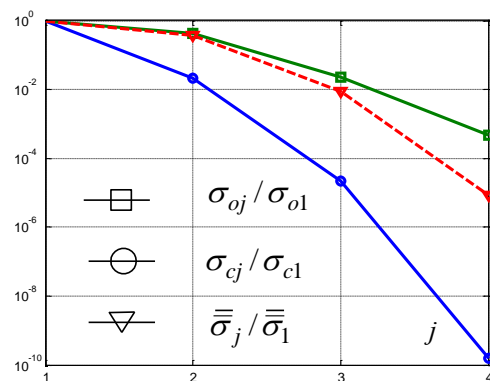
а также значения норм матриц $\|P_u\|_1 = 343,76$, $\|P_v\|_1 = 1,569$. Соответствующие диаграммы распределения сингулярных чисел приведены на рис. 4,б.

Полученные в итоге матрицы наблюдателя оптимальной структуры для ОУ1 имеют вид:

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} -1,589 & 7,107 & -8,953 & 0,635 \\ 1,276 & -7,136 & -0,973 & 0,0631 \\ 4,391 & 5,457 & -5,364 & -0,272 \\ 0,405 & -2,989 & 4,267 & -0,302 \end{bmatrix};$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} 0,4543 \\ 5,789 \cdot 10^{-2} \\ -4,409 \cdot 10^{-3} \\ 1,183 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix};$$

$$\hat{C} = [-3,562 \cdot 10^{-2} \ 0,2778 \ -2,118 \cdot 10^{-2} \ 1,0].$$



б)

Рис. 4. Диаграммы сингулярных чисел грамианов управляемости и наблюдаемости для ОУ 1

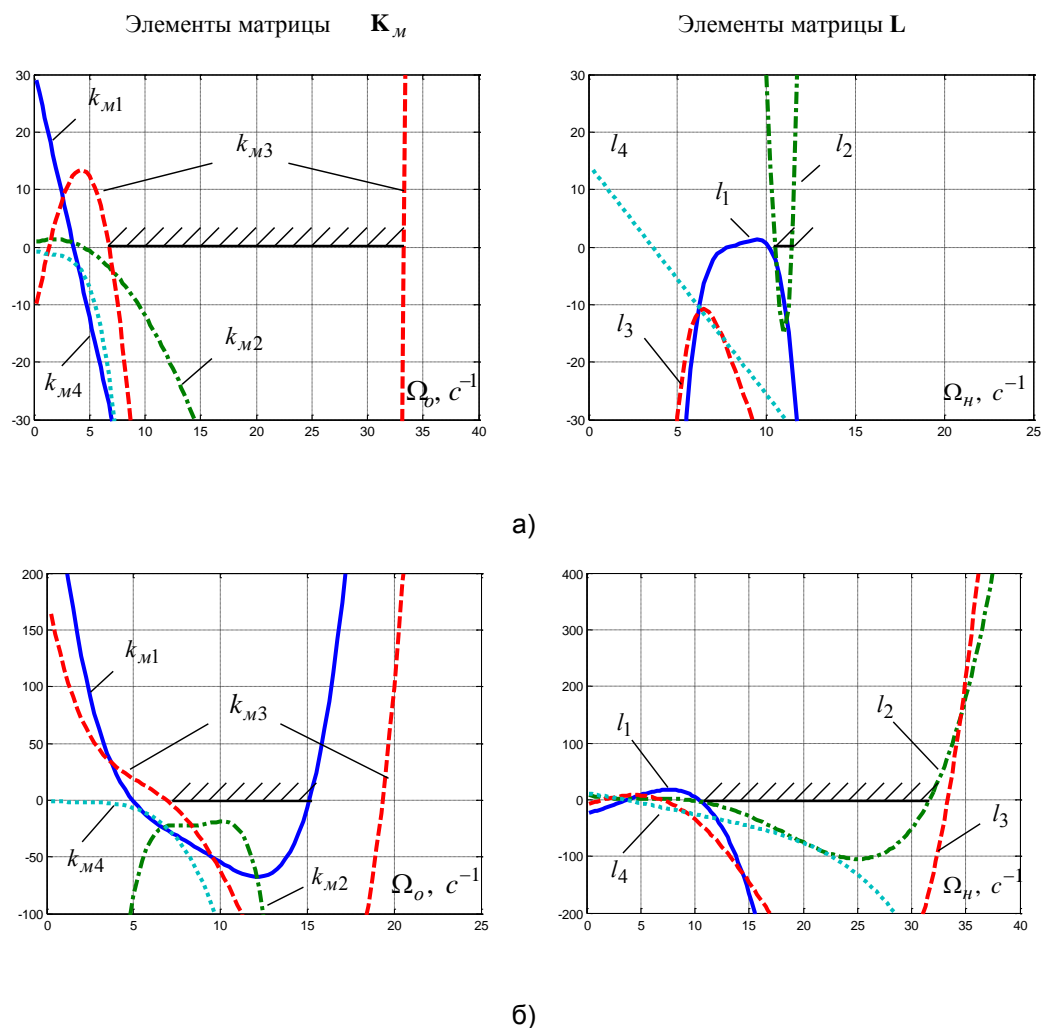


Рис. 5. Области параметрической грубости вариантов системы управления ОУ1 при РНС в форме объекта (а) и РНС оптимальной структуры (б)

Параметры РНС различной структуры для ОУ1

Структура	Параметры РНС	
Форма объекта	$\mathbf{K}_m = [-98,77 \ -32,78 \ -2,572 \cdot 10^2 \ -5,995 \cdot 10^2]$	$\mathbf{L} = [-7,374 \cdot 10^4 \ +5,430 \cdot 10^5 \ -4,168 \cdot 10^4 \ -1,056 \cdot 10^2]$
Оптимальная форма	$\hat{\mathbf{K}}_m = [-6,402 \quad -7,529 \cdot 10^2 \quad -2,023 \cdot 10^2 \quad -5,998 \cdot 10^2]$	$\hat{\mathbf{L}} = [-4,084 \cdot 10^3 \quad -51,47 \quad -2,651 \cdot 10^2 \quad -2,424 \cdot 10^2]$
Сбалансированная форма	$\mathbf{K}_m'' = [-2,770 \cdot 10^2 \ +1,109 \cdot 10^2 \ +1,363 \cdot 10^2 \ +50,84]$	$\mathbf{L}'' = [-4,416 \cdot 10^3 \quad -4,002 \cdot 10^3 \quad -1,117 \cdot 10^3 \quad -7,152 \cdot 10^3]$

Соответствующие матрицы РНС, приведенные в таблице, удовлетворяют условиям параметрической грубости ($\hat{\mathbf{K}}_m < 0$ и $\hat{\mathbf{L}} < 0$). Поэтому для реализации НС принимаем полученные значения $\hat{\mathbf{A}}, \hat{\mathbf{B}},$ и $\hat{\mathbf{C}}$.

В результате преобразований структуры наблюдателя удалось расширить область параметрической грубости контура подстройки РНС за счет сокращения соответствующей области контура управления

(рис. 5,б) по сравнению с наблюдателем в форме объекта (рис. 5,а).

Переходные характеристики вариантов системы управления ОУ1 при заданных значениях СГК Ω_O и Ω_H приведены на рис. 6,а, где кривая 1 получена при номинальных параметрах РНС (не зависит от формы представления НС); кривая 2 соответствует НС в форме объекта, а кривая 3 – оптимальной структуре НС при отклонении коэффициента l_2 на $\Delta l_2 = 0,05 l_2$.

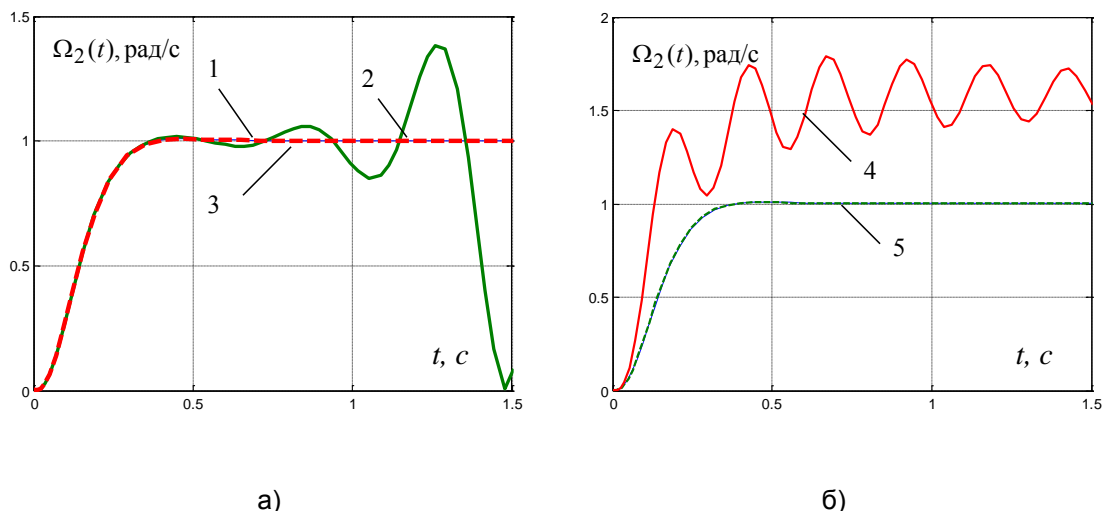


Рис. 6. Переходные характеристики системы управления ОУ1

Рассмотрим для сравнения систему управления с РНС в сбалансированной форме для ОУ1, преобразование которого с использованием процедуры *balreal()* дает следующие значения грамианов:

$$\mathbf{G}_c'' = \mathbf{G}_o'' = \text{diag}\{3, 137 \cdot 10^{-2}, 2, 32 \cdot 10^{-2}, 1, 15 \cdot 10^{-2}, 2, 27 \cdot 10^{-5}\},$$

а также значения норм матриц $\|\mathbf{P}_u\|_1 = \|\mathbf{P}_v\|_1 = 24,257$.

Процедура синтеза РНС для наблюдателя в сбалансированной форме при заданных значениях СГК Ω_o и Ω_n дает матрицы \mathbf{K}_M'' и \mathbf{L}'' , не отвечающие требованиям параметрической грубости (см. таблицу).

Переходные характеристики полученной системы приведены на рис. 6,б, где кривая 4 соответствует НС в сбалансированной форме, а кривая 5 – оптимальной структуре НС при отклонении коэффициентов k_1 на $\Delta k_1 = -0,35 k_1$.

Приведенный пример наглядно показывает, что с точки зрения параметрической грубости система с НС в сбалансированной форме значительно уступает системе с РНС, синтезированной предложенным методом.

Выводы. Предлагаемый грамианный подход позволяет сформировать структуру наблюдателя состояния с определенным соотношением свойств управляемости и наблюдаемости, обеспечивающую выполнение одного из условий параметрической грубости САУ – отсутствие положительных обратных связей в структуре РНС.

В основу метода положена процедура преобразования подобия модели объекта, при котором матрица преобразования

формируется путем вариации сингулярных чисел грамианов управляемости и наблюдаемости, что позволяет гибко менять соотношение управляемости и наблюдаемости модели, используемой при синтезе наблюдателя состояния.

Для объектов, близких к КФУ (с доминированием свойства управляемости), в соответствии с предлагаемым алгоритмом рекомендуется повышать степень наблюдаемости путем увеличения сингулярных чисел грамиана наблюдаемости, а для объектов, близких к КФН (с доминированием наблюдаемости), – повышать степень управляемости за счет увеличения сингулярных чисел грамиана управляемости.

Результаты выполненных исследований позволяют разработчикам вести целенаправленный структурно-параметрический синтез систем модального управления с РНС исходя из традиционных показателей качества и условий низкой чувствительности САУ к вариациям собственных параметров устройства управления.

Список литературы

1. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
2. Воронов А.А. Введение в динамику сложных управляемых систем. – М.: Наука, 1985. – 352 с.
3. Поляк Б.Т. Международный симпозиум «Робастность в идентификации и управлении» // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 8. – С. 185–193.

4. **Подчукаев В.А.** Аналитические методы теории автоматического управления. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 256 с.

5. **Поляк Б.Т., Щербakov П.С.** Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.

6. **Тарарыкин С.В., Тютиков В.В.** Робастное модальное управление динамическими системами // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 5. – С. 41–55.

7. **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.

8. **Анисимов А.А., Тарарыкин С.В.** Особенности синтеза параметрически грубых систем модального управления с наблюдателями состояния // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2012. – № 5. – С. 3–14.

9. **Изерман Р.** Цифровые системы управления: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 541 с.

10. **Некоторые** методы синтеза регуляторов пониженного порядка и заданной структуры / В.А. Бойченко, А.П. Курдюков, В.Н. Тимин и др. // Управление большими системами. – 2007. – Вып. 19. – С. 23–126.

11. **Мироновский Л.А., Соловьева Т.Н.** Анализ и синтез модально-сбалансированных систем // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 2013. – № 4. – С. 59–79.

12. **Конструирование** объекта управления. Ч. 1 / Д.С. Бирюков, Н.А. Дударенко, О.В. Слита, А.В. Ушаков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 6. – С. 2–6.

13. **Бирюков Д.С., Дударенко Н.А., Ушаков А.В.** Контроль вырождения динамических систем: грамианный подход // Изв. вузов. Приборостроение. – 2013. – № 4. – С. 34–37.

14. **Ober R., McFarlane D.** Balanced Canonical Forms for Minimal Systems: A Normalized Coprime Factor Approach // Linear Algebra Appl. – 1989. – Vol. 122–124. – P. 23–64.

15. **Moore B.C.** Principal Component Analysis in Linear Systems: Controllability, Observability and Model Reduction // IEEE Trans. Automat. Control. – 1981. – Vol. AC-26. – P. 17–32.

References

1. Kuzovkov, N.T. *Modal'noe upravlenie i nablyudayushchie ustroystva* [Modal control and observing device]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1976. 184 p.

2. Voronov, A.A. *Vvedenie v dinamiku slozhnykh upravlyaemykh sistem* [Introduction to the dynamics of complex controlled systems]. Moscow: Nauka, 1985. 352 p.

3. Polyak, B.T. Mezhdunarodnyy simpozium «Robastnost' v identifikatsii i upravlenii» [International Symposium "Robustness in Identification and Management"]. *Izvestiya RAN. Avtomatika i telemekhanika*, 1999, no. 8, pp. 185–193.

4. Podchukaev, V.A. *Analiticheskie metody teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Analytical methods of automatic control theory]. Moscow: FIZMATLIT, 2002. 256 p.

5. Polyak, B.T., Shcherbakov, P.S. *Robastnaya ustoychivost' i upravlenie* [Robust stability and control]. Moscow: Nauka, 2002. 303 p.

6. Tararykin, S.V., Tyutikov, V.V. Robastnoe modal'noe upravlenie dinamicheskimi sistemami [Robust modal control of dynamic systems] *Izvestiya RAN. Avtomatika i telemekhanika*, 2002, no. 5, pp. 41–55.

7. Anisimov, A.A., Kotov, D.G., Tararykin, S.V., Tyutikov, V.V. Analysis of Parametric Sensitivity and Structural Optimization of Modal Control Systems with State Controllers. *Journal of Computer and System Sciences International*, 2011, vol. 50, no. 5, pp. 698–719.

8. Anisimov, A.A., Tararykin, S.V. Peculiarities of Synthesis of Parametrically Robust Modal Control System with State Observers. *Journal of Computer and System Sciences International*, 2012, vol. 51, no. 5, pp. 617–627.

9. Izerman, R. *Tsifrovye sistemy upravleniya* [Digital control systems]. Moscow: Mir, 1984. 541 p.

10. Boychenko, V.A., Kurdyukov, A.P., Timin, V.N., Chaykovskiy, M.M., Yadykin, I.B. Nekotorye metody sinteza regulyatorov ponizhennogo poryadka i zadannoy struktury [Some methods for synthesizing regulators of reduced order and a given structure]. *Upravlenie bol'shimi sistemami*, 2007, vol. 19, pp. 23–126.

11. Mironovskiy, L.A., Solov'eva, T.N. Analiz i sintez modal'no-sbalansirovannykh sistem [Analysis and synthesis of modally balanced systems]. *Izvestiya RAN. Avtomatika i telemekhanika*, 2013, no. 4, pp. 59–79.

12. Biryukov, D.S., Dudarenko, N.A., Slita, O.V., Ushakov, A.V. Konstruirovaniye ob"ekta upravleniya. Ch.1 [Construction of a control object. Part 1]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2013, no. 6, pp. 2–6.

13. Biryukov, D.S., Dudarenko, N.A., Ushakov, A.V. Kontrol' vyrozheniya dinamicheskikh sistem: gramianny podkhod [Control of degeneration of dynamical systems: Gramian approach]. *Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye*, 2013, no. 4, pp. 34–37.

14. Ober, R., McFarlane, D. Balanced Canonical Forms for Minimal Systems: A Normalized Coprime Factor Approach. *Linear Algebra Appl.*, 1989, vol. 122–124, pp. 23–64.

15. Moore, B.C. Principal Component Analysis in Linear Systems: Controllability, Observability and Model Reduction. *IEEE Trans. Automat. Control*, 1981, vol. AC-26, pp. 17–32.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.165

Владимир Павлович Жуков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Григорий Васильевич Ледуховский

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, ректор, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-99, e-mail: rector@ispu.ru

Кирилл Николаевич Бубнов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: kirill.bubnov.96@mail.ru

Сергей Ильич Шувалов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Михаил Александрович Кузнецов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: mihailkuznecov908@gmail.com

Матричное моделирование и диагностика состояния регенеративных подогревателей высокого давления

Авторское резюме

Состояние вопроса. Повышение эффективности работы теплообменных аппаратов является одним из основных путей энергосбережения, которое относится к приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий Российской Федерации. Совершенствование процессов тепломассообмена в регенеративных подогревателях и конденсаторах турбоустановок тепловых электрических станций позволяет существенно повысить эффективность работы энергетического оборудования. Диагностика состояния и совершенствование режимов работы регенеративных подогревателей высокого давления, которые являются составной частью систем регенеративного подогрева питательной воды турбоустановок, являются актуальными научными и практическими задачами.

Материалы и методы. Для разработки модели регенеративного подогревателя высокого давления использована методология матричной формализации описания тепло- и массообменных процессов. Для решения задач диагностирования состояния поверхностей нагрева теплообменного оборудования применены методы математического программирования.

Результаты. В рамках методологии матричной формализации разработан подход к моделированию и решению задач диагностики многоступенчатых теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях. Исследована чувствительность полученного решения к входным сигналам. Получены и проанализированы решения задачи для возможного диагностирования состояния регенеративного подогревателя высокого давления.

Выводы. Анализ полученных расчетных результатов показал адекватное описание моделью реального теплообменного процесса для анализируемого подогревателя и возможность использования предложенной модели для мониторинга и оперативной диагностики состояния энергетического оборудования. Предложенный подход позволяет формулировать и решать обратные задачи диагностики состояния оборудования теплообменных установок различного назначения.

Ключевые слова: регенеративный подогрев питательной воды, паровая турбина, методология матричной формализации, уравнение баланса энергий, многоступенчатые теплообменные аппараты

Vladimir Pavlovich Zhukov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor, Head of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Grigory Vasilievich Ledukhovskiy

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Rector, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-99, e-mail: rector@ispu.ru

Kirill Nikolaevich Bubnov

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: kirill.bubnov.96@mail.ru

Sergei Ilyich Shuvalov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Mikhail Alexandrovich Kuznetsov

Ivanovo State Power Engineering University, Student, Russia, Ivanovo, e-mail: mihailkuznecov908@gmail.com

Matrix modeling and condition diagnostics of high pressure regenerative heaters

Abstract

Background. Increasing the efficiency of heat exchangers is a promising area of energy saving, which is one of the priority areas of the development of science, engineering, and technology in the Russian Federation. Improvement of heat and mass transfer in regenerative heaters and condensers of turbine units of thermal power plants can significantly increase the operating efficiency of power equipment. Diagnostics of the condition and improvement of operating modes of the high-pressure regenerative heater which are an integral part of regenerative heating systems for feedwater of turbine units, are urgent scientific and practical tasks.

Materials and methods. To develop a model of a high-pressure regenerative heater, the methodology of matrix formalization of the description of heat and mass transfer processes has been used. To solve problems of diagnosing the state of heating surfaces of heat exchange equipment, mathematical programming methods have been applied.

Results. Within the framework of the matrix formalization methodology, an approach to modeling and solving diagnostic problems of multi-stage heat exchangers considering the phase transition in coolants has been developed. The sensitivity of the resulting model to input signals has been studied. Solutions of the problem of diagnosing the state of a high-pressure regenerative heater have been obtained and analyzed.

Conclusions. Analysis of the obtained calculated results has shown an adequate description using the model of the real heat exchange process for the analyzed heater and the possibility to use the proposed model for monitoring and operational diagnostics of power equipment. The proposed approach allows us to formulate and solve inverse problems of diagnosing the state of equipment of heat exchange installations for various purposes.

Key words: regenerative heating of feedwater, steam turbine, matrix formalization methodology, energy balance equation, multi-stage heat exchangers

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.082-091

Введение. Эффективная организация функционирования системы регенеративного подогрева питательной воды (системы регенерации) турбоустановок тепловых электрических станций (ТЭС) и атомных электрических станций (АЭС) позволяет существенно (на 12 %) повысить коэффициент полезного действия энергоблока [1–6]. Загрязнение поверхностей нагрева, наличие неисправностей и дефектов в системе регенерации приводит к снижению тепловой экономичности турбоустановки [6–9]. Диагностика состояния поверхностей нагрева теплообменных аппаратов позволяет своевременно выявлять загрязнение и наличие дефектов, что, в свою очередь, позволяет прогнозировать возможное развитие аварийных и нештатных ситуаций и оперативно их устранять [10, 11]. Для диагностики и прогнозирования состояния оборудования предлагается использовать подходы, базирующиеся на нейросетевых и регрессионных зависимостях или на математических моделях оборудования [10, 11]. Первые два подхода связаны с использованием больших массивов данных, которые должны соответствовать как штатным, так и нештатным и аварийным режимам работы оборудования. Возможность получения таких данных для аварийных и нештатных условий работы энергоблоков ТЭС и АЭС связана с определенными трудностями, обусловленными частичной или полной утерей данных при нештатных или аварийных ситуациях или с ограничениями открытого доступа к этим данным. Разработка систем диагностики на базе математических моделей технологического оборудования лишена указанных ограничений, поэтому является наиболее перспективным направлением построения указанных систем [10, 11].

В настоящем исследовании под прямыми задачами теплопередачи [11] понимаются задачи, ориентированные на проведение поверочных расчетов, при выполнении которых предполагается подбор оборудования из стандартного ряда, при фиксированных конструктивных параметрах. Расчетom проверяются возможности функционирования оборудования для конкретных условий.

В обратных задачах выполняются, как правило, проектные расчеты, которые ориентированы на выбор конструктивных и режимных параметров, обеспечивающих эффективную работу [11] или диагностику состояния оборудования. Ранее нами были сформулированы и решены обратные задачи теплопередачи, построенные на матричном подходе к моделированию процессов теплопередачи, для регенеративных подогревателей низкого давления и для конденсационных установок ТЭС [11].

Ниже представлено развитие матричного подхода для моделирования и диагностики регенеративных подогревателей высокого давления, которые имеют более сложную структуру потоков и более высокие значения параметров теплоносителей по сравнению с подогревателями низкого давления [12, 13].

Регенеративные подогреватели высокого давления обычно дополнительно оборудуются поверхностями теплообмена для охлаждения пара и конденсата [14–16]. Кроме питательной воды в подогреватель дополнительно могут подаваться потоки дренажей из подогревателя с более высоким давлением. Процесс теплопередачи в подогревателях обычно сопровождается фазовым переходом при конденсации турбинного пара, что существенно усложняет моделирование процесса теплообмена в этих установках. В существующих методах расчета регенеративных подогревателей [1, 4, 6] в качестве исходных данных используются величины недогрева питательной воды в подогревателе до температуры насыщения пара. Данные параметры получаются, как правило, в результате статистической обработки результатов испытания существующего исправного оборудования. Их проблематично использовать для диагностики состояния поверхностей нагрева загрязненного или неисправного оборудования. Разработка адекватных методов расчета и их использование для решения задач диагностики регенеративных подогревателей высокого давления турбоустановки с учетом сложной структуры организации потоков теплоносителей и фазового перехода

в теплоносителях является актуальной задачей, стоящей перед энергетикой [9].

Объектом исследования является подогреватель высокого давления (ПВД) системы регенерации турбоустановки. В качестве **предмета** исследования рассматривается постановка и решение прямой задачи и задачи диагностики состояния подогревателей высокого давления с учетом фазового перехода в горячем теплоносителе.

Целью исследования является анализ чувствительности и прогностических возможностей модели для разработки систем диагностики состояния поверхностей нагрева подогревателя высокого давления на основе решения прямой и обратной задач теплопередачи.

Для достижения цели исследования разрабатывается матричная модель процесса теплопередачи в ПВД, на основе которой формулируется прямая задача и анализируется чувствительность и возможность модели для решения задач диагностики состояния подогревателя.

Материалы и методы. Метод и характеристика объекта исследования. Объект исследования с указанием направления движения основных потоков теплоносителей показан на рис. 1.

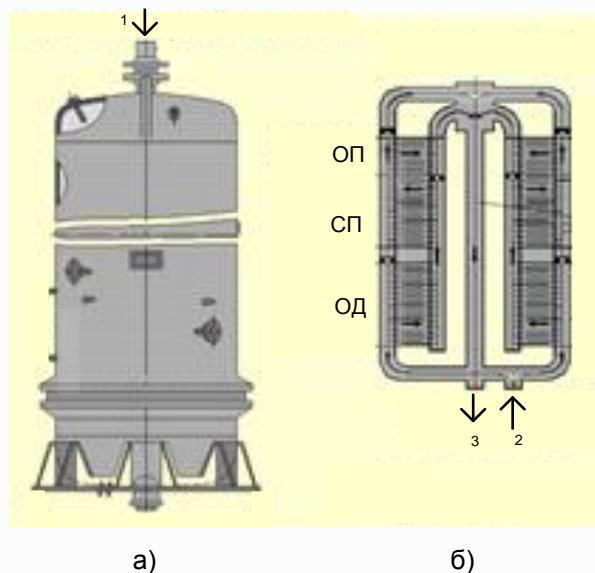


Рис. 1. Вид регенеративного подогревателя высокого давления (а) с указанием основных потоков теплоносителей (б)

Поток пара из отбора турбины 1 подается сверху в межтрубное пространство охладителя пара (ОП), затем направляется в собственно подогреватель (СП), где происходит его конденсация и переход в жидкую

фазу. Образовавшийся конденсат дополнительно охлаждается, передавая тепловую энергию питательной воде в охладителе дренажа (ОД). Питательная вода 2 сначала поступает в охладитель дренажа, затем в собственно подогреватель, где происходит ее нагрев за счет тепла конденсации отборного пара турбины. Затем питательная вода направляется в охладитель пара, после которого покидает подогреватель 3. Следует отметить, что в охладитель дренажа и охладитель пара направляется только часть питательной воды, что реализуется посредством установки дроссельных шайб. Ниже анализируется последний по ходу питательной воды подогреватель высокого давления, после которого питательная вода направляется в котел. При этом дренаж конденсата пара вышестоящего подогревателя не поступает в рассматриваемый подогреватель. Наличием отсоса паровоздушной смеси из парового пространства подогревателя ввиду малости его расхода пренебрегаем.

Традиционно в качестве исходных данных при моделировании регенеративных подогревателей [4–6] задаются величиной недогрева питательной воды до состояния насыщения, что позволяет проводить проверочные расчеты новых и чистых поверхностей нагрева. Однако такой подход проблематично использовать для расчета и диагностики подогревателей, которые имеют дефекты или загрязненные поверхности нагрева. Для моделирования многопоточных и многоступенчатых аппаратов, к которым относятся ПВД, предлагается матричный подход [9–11], который не требует задания указанных величин и может использоваться для диагностики состояния поверхностей нагрева.

Схема потоков с указанием направления движения теплоносителей в подогревателе высокого давления представлена на рис. 2,а. Расчетная схема потоков, которая используется при составлении уравнений модели, показана на рис. 2,б. В качестве определяющей координаты процесса теплопередачи выбирается площадь поверхности нагрева F , направление оси которой показано на рис. 2,б. Величина площади поверхности нагрева определяется суммарной площадью трубок (змеевиков), участвующих в теплообмене.

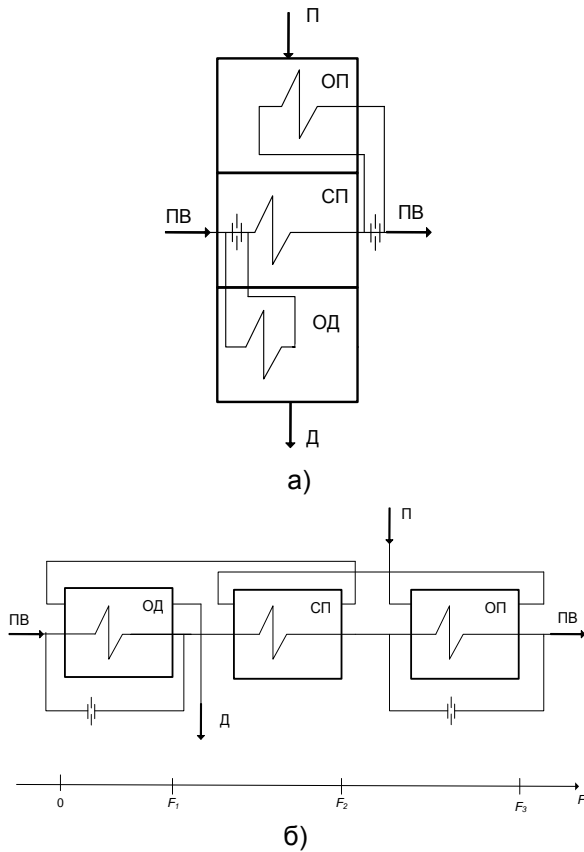


Рис. 2. Схема потоков теплоносителей в подогревателе (а), расчетная схема подогревателя (б) с указанием направления оси определяющей координаты процесса F : П – пар; ПВ – питательная вода; Д – дренаж; ОП – охладитель пара; СП – собственно подогреватель; ОД – охладитель дренажа

Согласно расчетной схеме, представленной рис. 2,б, строится модель процесса теплопередачи отдельно для каждой из трех ступеней подогревателя в виде системы двух дифференциальных уравнений. Указанная система представляется в следующем виде [9]:

– для охладителя дренажа

$$\begin{cases} \frac{dt_1}{dF} = a_1(t_1 - t_2), \\ \frac{dt_2}{dF} = a_2(t_1 - t_2); \end{cases} \quad (1)$$

– для собственно подогревателя

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dF} = a_3(t_{n1} - t_2), \\ \frac{dt_2}{dF} = a_4(t_{n1} - t_2); \end{cases} \quad (2)$$

– для охладителя пара

$$\begin{cases} \frac{dt_1}{dF} = a_5(t_1 - t_2), \\ \frac{dt_2}{dF} = a_6(t_1 - t_2), \end{cases} \quad (3)$$

где $a_1 = k_1/(c_1 G_1)$; $a_2 = k_1/(c_2 G_{2OD})$; $a_3 = k_2/(r G_1)$; $a_4 = k_2/(c_2 G_2)$; $a_5 = k_3/(c_1 G_1)$; $a_6 = k_3/(c_2 G_{2OP})$; t – температура теплоносителя; x – степень сухости пара; k – коэффициент теплопередачи (нижний индекс соответствует номеру ступени по ходу движения питательной воды: 1 – ОД; 2 – СП; 3 – ОП); r – удельная теплота парообразования; c – удельная теплоемкость; G – расход теплоносителя (одинарный индекс показывает номер теплоносителя: 1 – горячий теплоноситель (пар, дренаж); 2 – холодный теплоноситель (питательная вода)).

Состояние пара при конденсации в СП описывается степенью сухости x , которая показывает массовую долю пара в пароводяной смеси [4, 9]. Температура пара в состоянии насыщения при этом считается постоянной ($t_n = \text{const}$).

При начальных условиях $t_2|_{F=0} = t_{20}$,

$t_1|_{F=F_1} = t_{10} = t_n$ решение системы дифференциальных уравнений (1) для ОД представляется в матричном виде [9, 11]:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & -1 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{10}^* \\ t_{20}^* \\ t_1^* \\ t_2^* \end{pmatrix}, \quad (4)$$

или

$$\mathbf{B}_1 \times \mathbf{T}_1 = \mathbf{T}_{10}, \quad (5)$$

где

$$\mathbf{B}_1 = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & -1 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{T}_1 = \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{T}_{10} = \begin{pmatrix} t_{10}^* \\ t_{20}^* \\ t_1^* \\ t_2^* \end{pmatrix}.$$

Матрица \mathbf{T}_1 составляется из неизвестных параметров системы (1), а матрица свободных членов \mathbf{T}_{10} заполняется значениями известных параметров, которые отмечены звездочкой. Если значение параметра неизвестно, то в матрице \mathbf{T}_{10} соответствующий элемент зануляется. Разреженная матрица \mathbf{B}_1 в уравнении (5) состоит преимущественно из нулевых элементов. Ниже приводятся выражения только для

ненулевых элементов разреженной матрицы $\mathbf{B}_1 = \{b_{ij}\}$:

$$\begin{aligned} b_{11} &= -C_3 + C_3 * a_1 / a_2; \quad b_{12} = 1 + C_3 - C_3 * a_1 / a_2; \\ b_{13} &= -1; \quad b_{14} = 0; \quad b_{21} = -C_3 + C_3 * \exp((a_1 - a_2) * F_1); \\ b_{22} &= 1 + C_3 - C_3 * \exp((a_1 - a_2) * F_1); \quad b_{23} = 0; \\ b_{24} &= -1; \quad C_3 = 1 / (a_1 / a_2 * \exp((a_1 - a_2) * F_1) - 1), \end{aligned}$$

где F_1 – площадь поверхности теплообмена ОД.

Для моделирования теплообмена в СП принимается, что степень сухости пара на входе в СП равна единице ($x_{10} = 1$), а на выходе пар полностью превращается в воду ($x_1 = 0$). Решение системы (2) с начальными условиями $x_1|_{F=F_2} = x_{10}$, $t_2|_{F=F_1} = t_{20}$, $x_1|_{F=F_1} = x_1$

записывается в виде пяти уравнений с использованием дополнительно в качестве неизвестного параметра температуры насыщения в подогревателе:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & -1 & 0 & b_{15} \\ 0 & b_{22} & 0 & 1 & b_{25} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{10} \\ t_{20} \\ x_1 \\ t_2 \\ t_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{10}^* \\ t_{20}^* \\ x_1^* \\ t_2^* \\ t_n^* \end{pmatrix},$$

или $\mathbf{B}_2 \times \mathbf{T}_2 = \mathbf{T}_{20}$, (6)

где

$$\mathbf{B}_2 = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & -1 & 0 & b_{15} \\ 0 & b_{22} & 0 & 1 & b_{25} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{T}_2 = \begin{pmatrix} x_{10} \\ t_{20} \\ x_1 \\ t_2 \\ t_n \end{pmatrix}; \quad \mathbf{T}_{20} = \begin{pmatrix} x_{10}^* \\ t_{20}^* \\ x_1^* \\ t_2^* \\ t_n^* \end{pmatrix},$$

где $b_{11} = 1; b_{12} = a_3 / a_4 * (1 - \exp(-a_4 * F_2)); b_{13} = -1;$

$$b_{14} = 0; \quad b_{15} = -a_3 / a_4 * (1 - \exp(-a_4 * F_2));$$

$$b_{21} = 0; \quad b_{22} = -\exp(-a_4 * F_2); \quad b_{23} = 0; \quad b_{24} = 1;$$

$b_{25} = -(1 - \exp(-a_4 * F_2)); F_2$ – площадь поверхности теплообмена СП.

Для описания охладителя пара решение системы (3) при выбранных начальных

условиях $t_1|_{F=F_3} = t_{10}$, $t_2|_{F=F_2} = t_2$ записывается в матричной форме следующим образом:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & -1 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{10}^* \\ t_{20}^* \\ t_1^* \\ t_2^* \end{pmatrix},$$

или

$$\mathbf{B}_3 \times \mathbf{T}_3 = \mathbf{T}_{30}, \quad (7)$$

где

$$\mathbf{B}_3 = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & -1 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{T}_3 = \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{T}_{30} = \begin{pmatrix} t_{10}^* \\ t_{20}^* \\ t_1^* \\ t_2^* \end{pmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} b_{11} &= -C_4 + C_4 * a_5 / a_6; \quad b_{12} = 1 + C_4 - C_4 * a_5 / a_6; \\ b_{13} &= -1; \quad b_{14} = 0; \quad b_{21} = -C_4 + C_4 * \exp((a_5 - a_6) * F_3); \\ b_{22} &= 1 + C_4 - C_4 * \exp((a_5 - a_6) * F_3); \quad b_{23} = 0; \\ b_{24} &= -1; \quad C_4 = 1 / (a_5 / a_6 * \exp((a_5 - a_6) * F_3) - 1); \end{aligned}$$

F_3 – площадь поверхности теплообмена ОП.

Через охладитель пара и охладитель дренажа проходит только часть питательной воды. На выходе из ОП и ОД потоки смешиваются, а температура питательной воды после смешивания определяется из уравнения баланса энергий:

$$\begin{aligned} \langle t \rangle_2^{\text{ОД}} &= t_{20} * (1 - \alpha_1) + t_2 * \alpha_1, \\ \langle t \rangle_2^{\text{ОП}} &= t_{20} * (1 - \alpha_3) + t_2 * \alpha_3, \end{aligned} \quad (8)$$

где α_1, α_3 – доли питательной воды, подаваемые в ОД и ОП соответственно.

Математическая модель, представленная зависимостями (4)–(8), позволяет описывать процесс теплообмена в регенеративном подогревателе высокого давления.

Результаты. Практические расчеты. Расчетные исследования в рамках предложенной модели выполнены для регенеративного подогревателя высокого давления типа ПВ 900-380-66. Исходные данные приведены в таблице. Алгоритм расчета ПВД показан на рис. 3.

Исходные данные для расчета подогревателя

Наименование параметра, обозначение, единица измерения	Значение
Расход пара G_1 , кг/с	13,90
Расход питательной воды G_2 , кг/с	269,91
Температура пара на входе в подогреватель t_{10} , °C	375
Температура насыщения пара при давлении перед подогревателем t_n , °C	279
Температура питательной воды на входе в подогреватель t_{20} , °C	242
Теплоемкость конденсата пара c_1 , Дж/кг/К	4187
Теплоемкость пара c_{1p} , Дж/кг/К	2250
Теплоемкость питательной воды c_2 , Дж/кг/К	4347
Теплота парообразования r , Дж/кг	1944000
Поверхность нагрева общая F , м ²	980
Поверхность нагрева ОД F_1 , м ²	75
Поверхность нагрева ОП F_3 , м ²	101
Доля расхода питательной воды через ОД α_1	0,2725
Доля расхода питательной воды через ОП α_3	0,0305
Коэффициент теплопередачи в ОД k_1 , Вт/м ² /К	2627
Коэффициент теплопередачи в СП k_2 , Вт/м ² /К	2614
Коэффициент теплопередачи в ОП k_3 , Вт/м ² /К	671

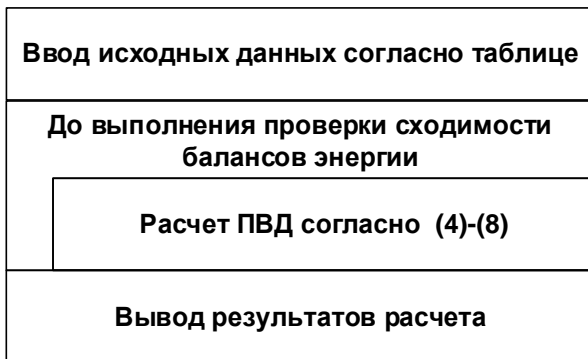


Рис. 3. Алгоритм расчета ПВД

Результаты расчетных исследований подогревателя высокого давления представлены на рис. 4 в виде зависимости температуры горячего теплоносителя (штриховая линия) и температуры питательной воды (сплошная линия) вдоль поверхностей нагрева регенеративного подогревателя.

Проверка адекватности модели проводилась посредством сопоставления нормируемой величины недогрева питательной воды до температуры насыщения, которая, согласно опубликованным данным¹, составляет 3 °C. В рамках проведенного расчета получено значение величины недогрева 2,9 °C. Отклонение расчетного значения от нормативного составило менее 0,3 %. Погрешности при сведении энергетических ба-

лансов по ступням и по подогревателю в целом составили менее 0,2 %. Анализ представленных расчетных результатов и нормативных данных показал корректность и адекватность разработанной модели.

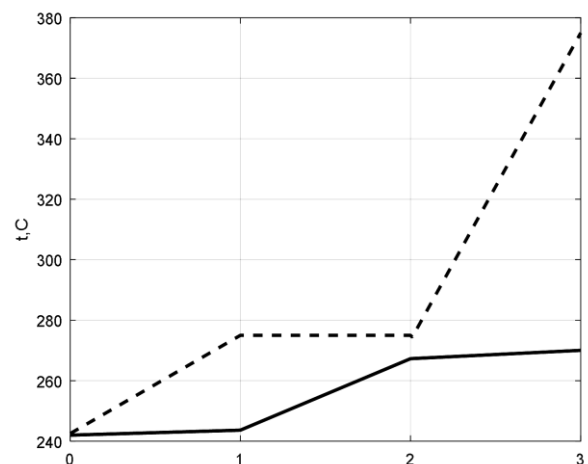


Рис. 4. Зависимость температуры пара (штриховая линия) и температуры питательной воды (сплошная линия) вдоль поверхностей нагрева от номера ступени ПВД: 1 – ОД; 2 – СП; 3 – ОП

Для оценки возможности использования представленной модели для решения задач диагностики состояния поверхностей нагрева ПВД проведен анализ чувствительности результатов модельных расчетов к возмущениям входных сигналов.

¹ Теплообменное оборудование паротурбинных установок: Отраслевой каталог. – М.: НИИЭинформэнергомаш, 1984. – 287 с.

На рис. 5 приведены результаты исследования анализа чувствительности модельных расчетов температуры насыщения пара в подогревателе и температуры питательной воды на выходе из ПВД к изменениям коэффициентов теплопередачи ОД, СП, ОП.

Расчетный анализ показал, что наиболее сильное влияние на рассчитанные характеристики ПВД оказывает изменение значения коэффициента теплопередачи собственно подогревателя (рис. 5,б), коэффициенты теплопередачи для ОД и ОП оказывают существенно меньшее влияние на теплообмен. Очевидно, это связано с меньшей площадью их поверхностей нагрева. Представленные результаты показывают, что в рамках предложенной модели целесообразно диагностировать состояние поверхностей нагрева собственно подогревателя по температуре насыщения или давлению пара в подогревателе.

Через охладитель пара и охладитель дренажа проходит только часть питательной воды, которая определяется параметрами дроссельных шайб. Загрязнение или износ дроссельной шайбы приводит к отклонению расходов воды от проектных значений. Для возможности диагностирования состояния дроссельных шайб проведены дополнительные расчетные исследования. На рис. 6 представлены результаты анализа чувствительности результатов модельных расчетов показателей работы подогревателя к возмущающим сигналам, в качестве которых рассматриваются доли потоков питательной воды, проходящие через охладитель пара и охладитель дренажа.

Анализ полученных результатов показал, что наиболее сильное влияние на температуру насыщения в подогревателе оказывает доля питательной воды, проходящая через ОД (рис. 6,а, кривая 2). На температуру питательной воды после подогревателя указанные анализируемые параметры оказывают практически одинаковые воздействия (рис. 6,а,б, кривые 1).

Дальнейшее исследование чувствительности и возможности использования разработанной модели при диагностике рассмотренных выше дефектов и загрязнений поверхностей нагрева предполагается выполнить в рамках постановки и решения оптимизационной задачи диагностики по аналогии с ранее выполненными исследованиями для конденсатора с теплофикационным

пучком [11]. Следует отметить, что каждый диагностируемый признак увеличивает число параметров оптимизации и время решения оптимизационной задачи.

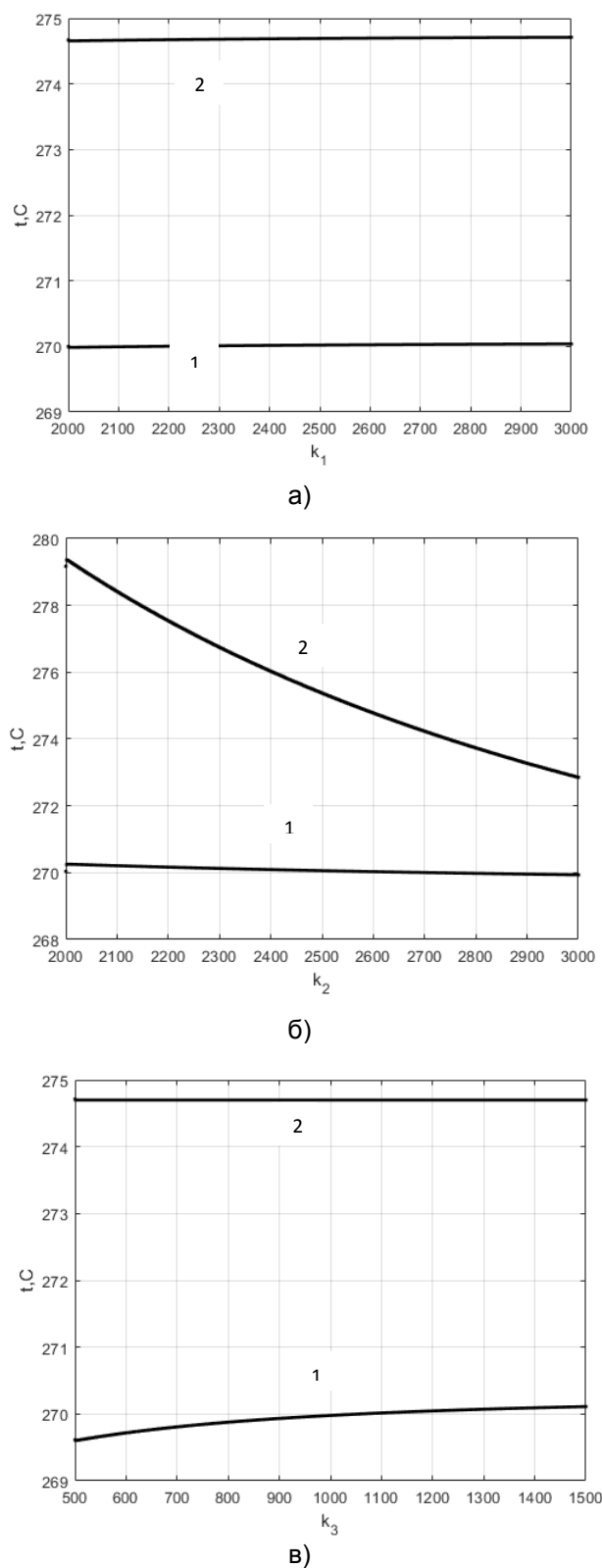


Рис. 5. Зависимости температуры насыщения (2) и питательной воды на выходе ПВД (1) от коэффициента теплопередачи ОД (а), СП (б), ОП (в)

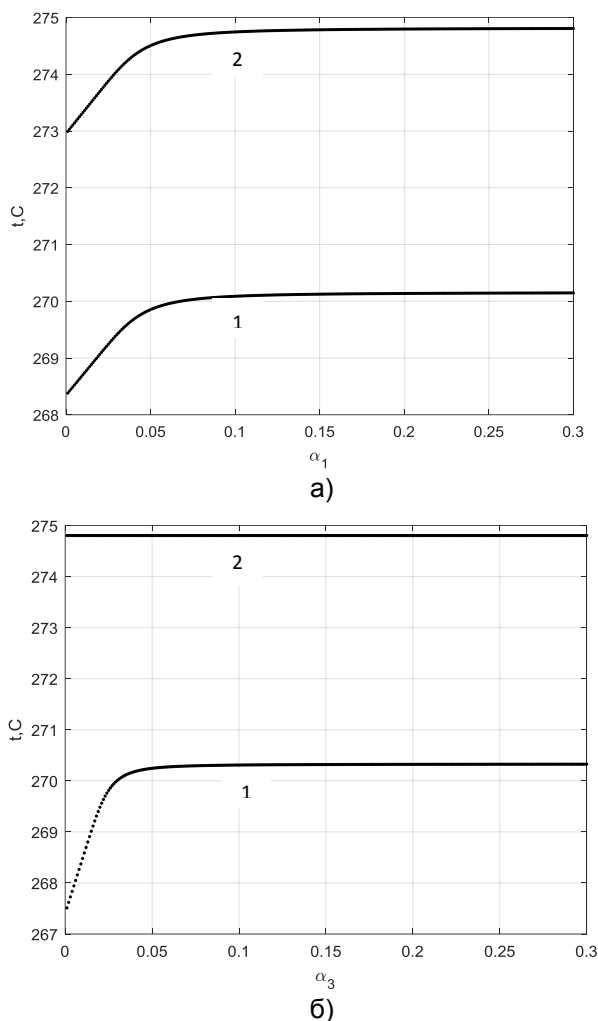


Рис. 6. Зависимости температуры воды на выходе ПВД (1) и температуры насыщения пара (2) от доли питательной воды, проходящей через ОД (а) и ОП (б)

Выводы. Выполненный расчетный анализ регенеративного подогревателя показал, что предложенная модель подогревателя и анализ ее чувствительности позволяют при ограниченном объеме используемых экспериментальных данных диагностировать состояние поверхностей нагрева охладителя дренажа, собственно подогревателя и охладителя пара.

Кроме этого, представленная модель позволяет диагностировать состояние дроссельной шайбы и контролировать расход питательной воды через охладитель пара и охладитель дренажа при ограниченном объеме используемых показаний штатных приборов.

Предложенный подход может быть использован для диагностики состояния работающего оборудования и перехода от проведения планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по состоянию.

Список литературы

1. Бродов Ю.М., Ниренштейн М.А. Расчет теплообменных аппаратов паротурбинных установок: учеб. пособие. – Екатеринбург: УГТУ, 2001. – 373 с.
2. Бродов Ю.М., Савельев Р.З. Конденсационные установки паровых турбин: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.
3. Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Энергетические характеристики оборудования ТЭС. – Иваново, 2014. – 232 с.
4. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.
5. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т. 1: пер. с англ. / под ред. О.Г. Мартыненко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.
6. Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М. Теплообменные аппараты ТЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 288 с.
7. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.
8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.
9. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических тепломассообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
10. 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.
11. Решение обратной задачи теплопередачи в конденсаторе турбоустановки со встроенным теплофикационным пучком / В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский, М.Д. Фомичев и др. // Вестник ИГЭУ. – 2024. – Вып. 1. – С. 85–91.
12. Бродов Ю.М. Атлас конструкций теплообменных аппаратов турбоустановок ТЭС и АЭС: учеб. пособие для вузов. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1980. – 31 с.
13. Теплообменные аппараты в системах регенеративного подогрева питательной воды паротурбинных установок: учеб. пособие для вузов / Ю.М. Бродов, М.А. Ниренштейн, К.Э. Аронсон, А.Ю. Рябчиков / под ред. Ю.М. Бродова. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1998. – 192 с.
14. Теплообменники энергетических установок: учебник для вузов / К.Э. Аронсон, С.Н. Блинков, В.И. Брезгин и др.; под ред. Ю.М. Бродова. – Екатеринбург: Сократ, 2003. – 968 с.
15. Бажан П.И., Каневец Г.М., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. – М.: Машиностроение, 1989. – 366 с.
16. Берман С.С., Михеева И.М. Расчет теплообменных аппаратов турбоустановок. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.

References

1. Brodov, Yu.M., Nirenshteyn, M.A. *Raschet teploobmennyykh apparatov paroturbinnyykh ustanovok* [Calculation of heat exchange devices of steam turbine installations]. Ekaterinburg: UGTU, 2001. 373 p.
2. Brodov, Yu.M., Savel'ev, R.Z. *Kondensatsionnye ustanovki parovykh turbin* [Condensing installations of steam turbines]. Moscow: Energoatomizdat, 1994. 288 p.
3. Ledukhovskiy, G.V., Pospelov, A.A. *Energeticheskie kharakteristiki oborudovaniya TES* [Energy characteristics of TPP equipment]. Ivanovo, 2014. 232 p.
4. Ryzhkin, V.Ya. *Teplovye elektricheskie stantsii* [Thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 328 p.
5. Martynenko, O.G. *Spravochnik po teploobmennikam v 2 t. T. 1* [Handbook of heat exchangers in 2 vols., vol. 1]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 560 p.
6. Nazmeev, Yu.G., Lavygin, V.M. *Teploobmennyye apparaty TES* [Heat exchangers of thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 288 p.
7. Isachenko, V.P. *Teploobmen pri kondensatsii* [Heat transfer during condensation]. Moscow: Energiya, 1977. 240 p.
8. Isachenko, V.P., Osipova, V.A., Sukomel, A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energoatomizdat, 1981. 416 p.
9. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennyykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass transfer installations]. Ivanovo, 2009. 176 p.
10. Zhukov, V.P., Barochkin, A.E., Bobrova, M.S., Belyakov, A.N., Shuvalov, S.I. *Matrichnyy metod resheniya obratnoy zadachi teploperedachi v teploobmennyykh apparatakh* [Matrix method to solve the inverse problem of heat transfer in heat exchangers]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 2, pp. 62–69.
11. Zhukov, V.P., Ledukhovskiy, G.V., Fomichev, M.D., Belyakov, A.N., Kuznetsov, M.A. *Reshenie obratnoy zadachi teploperedachi v kondensatore turboustanovki so vstroennym teplofikatsionnym puchkom* [The solution of the inverse problem of heat transfer in the condenser of a turbine unit with an integrated thermal beam]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 1, pp. 85–91.
12. Brodov, Yu.M. *Atlas konstruksiy teploobmennyykh apparatov turboustanovok TES i AES* [Atlas of designs of heat exchange devices of turbine installations of thermal power plants and nuclear power plants]. Ekaterinburg: UGTU-UIPI, 1980. 31 p.
13. Brodov, Yu.M., Nirenshteyn, M.A., Aronson, K.E., Ryabchikov, A.Yu. *Teploobmennyye apparaty v sistemakh regenerativnogo podogreva pitatel'noy vody paroturbinnyykh ustanovok* [Heat exchangers in systems of regenerative heating of feedwater of steam turbine installations]. Ekaterinburg: UGTU-UIPI, 1998. 192 p.
14. Aronson, K.E., Blinkov, S.N., Brezgin, V.I. *Teploobmenniki energeticheskikh ustanovok* [Heat exchangers of power plants]. Ekaterinburg: Sokrat, 2003. 968 p.
15. Bazhan, P.I., Kanevets, G.M., Seliverstov, V.M. *Spravochnik po teploobmennym apparatam* [Handbook of heat exchangers]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1989. 366 p.
16. Berman, S.S., Mikheeva, I.M. *Raschet teploobmennyykh apparatov turboustanovok* [Calculation of heat exchange apparatuses of turbine installations]. Moscow: Energia, 1973. 320 p.

УДК 66.092-977:66.011

Михаил Евгеньевич Соловьев

Ярославский государственный технический университет, доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационных систем и технологий, Россия, Ярославль, e-mail: me_s@mail.ru

Максим Игоревич Маркин

Ярославский государственный технический университет, старший преподаватель кафедры экономики и управления, Россия, Ярославль, e-mail: markinmi@ystu.ru

Математическое моделирование пиролиза резиновых отходов в горизонтальном цилиндрическом реакторе

Авторское резюме

Состояние вопроса. Переработка амортизированных резиновых изделий представляет собой важную экологическую и технико-экономическую проблему. Среди различных способов переработки таких отходов одним из наиболее эффективных является процесс пиролиза, поскольку позволяет получать топливо и энергию, а также обеспечивает возможность вторичного использования технического углерода и металла. Математическое моделирование данного процесса необходимо для решения задач оптимизации и автоматизированного управления. В связи с этим моделирование процесса пиролиза в горизонтальных цилиндрических реакторах периодического типа, которые в настоящее время получают все большее распространение, является актуальной задачей.

Материалы и методы. Для математического описания процесса используется модель с распределенными параметрами в виде двумерного уравнения теплопроводности и системы уравнений химической кинетики реакций термодеструкции полимера. Решение поставленной задачи осуществляется численно методом конечных элементов.

Результаты. В результате численного решения уравнений математической модели получены нестационарные распределения температуры и степени превращения углеводородов по сечению реактора при неоднородном его заполнении. Исследована кинетика реакции термодеструкции полимера в реакторах разного диаметра.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования кинетики деструкции материала при заданных условиях нагрева реактора, что может быть полезным при конструировании реакторов и автоматизации управления процессом пиролиза.

Ключевые слова: пиролиз резиновых отходов, кинетическая модель, цилиндрический реактор периодического типа, двумерное уравнение теплопроводности, уравнение химической кинетики

Mikhail Evgenievich Soloviev

Yaroslavl State Technical University, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Information Systems and Technologies Department, Russia, Yaroslavl, e-mail: me_s@mail.ru

Maxim Igorevich Markin

Yaroslavl State Technical University, Senior Lecturer of Economics and Management Department, Russia, Yaroslavl, e-mail: markinmi@ystu.ru

Mathematical modeling of pyrolysis of rubber waste in horizontal cylindrical reactor

Abstract

Background. Recycling of cushioned rubber products is an important environmental and technical-economic issue. Among the various methods of processing such waste, one of the most effective is the pyrolysis process, since it allows us to obtain fuel and energy, and provides the possibility of secondary use of carbon black and metal. Mathematical modeling of this process is necessary to solve problems of optimization and automated control. Thus, the purpose of this study is to simulate the pyrolysis process in a horizontal cylindrical batch reactor, which is currently becoming increasingly widespread.

Materials and methods. To mathematically describe the process, a model with distributed parameters is used in the form of a two-dimensional thermal conductivity equation and a system of equations of chemical kinetics of polymer thermal destruction reactions. The problem is solved numerically using the finite element method.

Results. As a result of the numerical solution of the equations of the mathematical model, non-stationary distributions of temperature and degree of conversion over the cross section of the reactor with non-uniform filling have been obtained. The authors have studied the kinetics of the reaction of polymer thermal destruction in reactors of different diameters.

Conclusions. The results obtained can be used to predict the kinetics of material destruction under given reactor heating conditions, which can be useful when we design reactors and automate pyrolysis process control.

Key words: pyrolysis of rubber waste, kinetic model, cylindrical batch reactor, two-dimensional heat equation, chemical kinetics equation

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.092-099

Введение. Проблема переработки изношенных шин и других резиновых отходов имеет глобальный характер [1]. Существуют различные способы переработки вторичных резин [2], среди которых пиролиз можно отнести к наиболее энергетически эффективным. Суть данного процесса состоит в нагревании резиновых отходов без доступа воздуха при температурах выше 350 °C [2, 3]. На выходе получается парогазовая смесь углеводородов, которые могут быть разделены на фракции и использованы в качестве топлива [4, 5], а также твердая углеродная фракция, которая после дальнейшей очистки и измельчения может быть переработана в технический углерод и отходы металла [6, 7]. Процесс может быть организован как по периодической, так и по непрерывной схеме [8]. В настоящее время широкое распространение получил вариант конструктивного оформления реактора в виде горизонтального вращающегося цилиндра [9, 10].

К числу преимуществ пиролиза шин можно отнести следующие: 1) экологичность – процесс не сопровождается вредными выбросами, в отличие от сжигания шин; 2) энергетическую эффективность – в отличие от переработки шин методом измельчения данный процесс не только не требует высоких энергозатрат, но и сам является источником тепловой энергии, которая может быть преобразована в электрическую, а также высокоэнергетического топлива; 3) универсальность – процессом пиролиза можно перерабатывать любые резиновые отходы, как твердые, так и жидкие и вязкотекучие; 4) возможность полной автоматизации процесса позволяет снизить влияние человеческого фактора и улучшить эффективность работы.

Математическое моделирование процесса переработки изношенных шин является важным инструментом для оптимизации процесса, прогнозирования результатов, анализа влияния различных факторов и снижения времени и затрат на разработку технологий [11–13]. Особый интерес представляет моделирование процесса пиролиза шин в силу его большей сложности по сравнению с другими способами переработки [14, 15]. Следует отметить, что подходы к математическому описанию процессов пиролиза основываются либо на использовании моделей с сосредоточенными параметрами [14–16], либо на использовании аппарата нейронных сетей [17]. Недостаток этих подходов состоит в том, что для практического использования таких моделей требуются эксперименты непосредственно на производственном оборудовании, поскольку параметры идентификации, полученные в результате экспериментов на лабораторной установке, нельзя в таком случае перенести на производственную установку. При использовании нейронных сетей к этому еще добавляется необходимость подготовки большого объема экспериментальных данных для обучения сети.

Целью настоящего исследования является создание математической модели пиролизного реактора с распределенными параметрами, позволяющей использовать результаты моделирования не только при оптимизации существующего процесса, но и при проектировании нового оборудования с отличающимися от существующего размерами и конструктивными особенностями.

Методы исследования. На рис. 1 приведена упрощенная схема пиролизного реактора. Резиновые отходы загружаются

внутри цилиндрической реторты 1, которая заключена в теплоизолированный кожух 2. В процессе работы реактора реторта обогревается газо-жидкостными горелками, расположенными вдоль оси цилиндра в нижней части реактора (на схеме не показаны). Дымовые газы, проходя между кожухом и внешней поверхностью реторты, выходят через патрубок 3. Разными производителями выпускаются как неподвижные, так и вращающиеся реакторы данного типа. В последнем случае для равномерного распределения тепла по поверхности реторты она укреплена на роликах и приводится во вращение механизмом, расположенным в задней части реактора. Отходы загружаются через люк в передней части реактора, через него же осуществляется выгрузка металлической проволоки, остающейся после пиролиза шин. Продукты пиролиза – парогазовая смесь углеводородов и технический углерод – выгружаются через осевое отверстие в задней части реактора.

Основная часть реторты обогревается достаточно однородно по длине оси цилиндра. С учетом этой цилиндрической симметрии рассмотрим двумерную модель распределения температуры и степени конверсии углеводородного материала резиновых отходов в среднем сечении реактора.

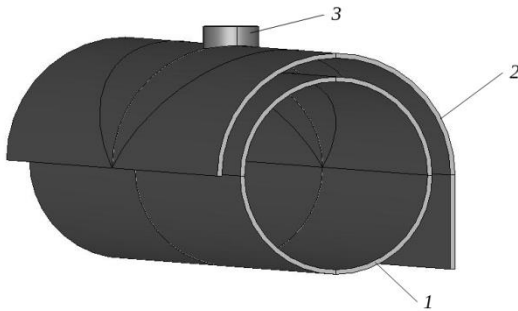


Рис. 1. Схема пиролизного реактора: 1 – реторта; 2 – теплоизолированный от внешней среды кожух; 3 – патрубок для отвода дымовых газов

Расчетная схема среднего сечения реторты в рамках данной модели показана на рис. 2. Область Ω внутри реторты в форме круга заданного диаметра D_r (центр системы координат, связанной с ретортой, совпадает с центром круга) с границей $\partial\Omega$ разбита на сетку треугольных конечных элементов.

Зависимость температуры от времени и координат в рассматриваемой области

$T = T(t, x, y)$ описывается уравнением нестационарной теплопроводности

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) \text{ в области } \Omega \times]0, t_{\text{end}}[, \quad (1)$$

где c, ρ, λ – теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности среды соответственно, являющиеся в общем случае функциями координат и времени.

В качестве параметра, характеризующего теплофизические свойства материала, рассматривался коэффициент температуропроводности $a = \frac{\lambda}{c\rho}$.

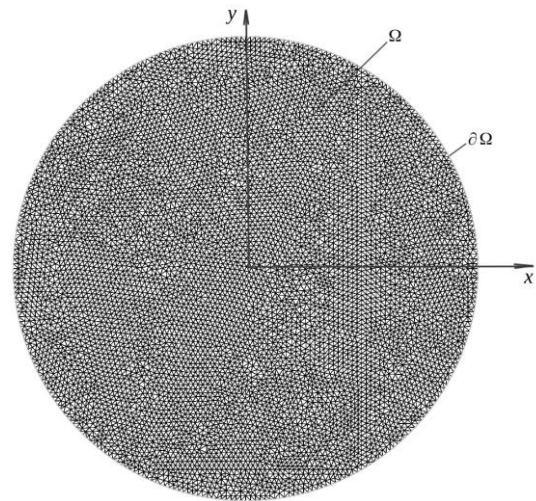


Рис. 2. Расчетная схема среднего сечения реторты

Уравнение (1) дополняется начальными условиями

$$T(0, x, y) = T_0(x, y) \quad \forall \Omega \quad (2)$$

и граничными условиями

$$T(t, x, y) = \mu(t, x, y) \quad (3)$$

на границе $\partial\Omega \times]0, t_{\text{end}}[$.

Начальное распределение температуры принималось постоянным и равным температуре окружающей среды T_0 в момент запуска реактора. Функция температуры на границе на основе анализа работы производственного реактора была принята в виде

$$\mu(t) = T_0 + dT_{\text{max}}(1 - \exp(-k_{\mu}t)), \quad (4)$$

где dT_{max} – максимальное увеличение температуры стенки реактора; k_{μ} – коэффициент скорости увеличения температуры, для которого было принято значение $9 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Загруженный реактор частично заполнен резиновыми отходами, в том числе изношенными шинами легковых и грузовых

машин, заполняющими среднюю часть реактора, а также отходами производства шин (в нижней части реактора). Поскольку коэффициенты температуропроводности парогазовой фракции в верхней части реактора, изношенных шин в средней части реактора и резиновых отходов в нижней части реактора различаются, для коэффициента температуропроводности была принята его зависимость от вертикальной координаты y в форме кусочной функции следующего вида:

$$a(y) = a_0(y \leq (D_r \alpha_0 - D_r / 2)) + \sum_{i=1}^2 a_i(y > (D_r \alpha_{i-1} - D_r / 2)) \wedge (y \leq (D_r \alpha_i - D_r / 2)), \quad (5)$$

где a_i , α_i – коэффициенты температуропроводности, $\text{мм}^2/\text{с}$, и коэффициенты высоты слоев соответственно, для которых были приняты оценки $a_i = [0,12 \cdot 10^{-6}, 0,9 \cdot 10^{-6}, 19,0 \cdot 10^{-6}]$, $\alpha_i = [0,2, 0,6, 1,0]$.

При численном решении для производной температуры по времени принималась разностная аппроксимация с шагом по времени τ , так что задачу (1) можно представить в разностной форме по времени

$$\frac{T^{m+1} - T^m}{\tau} = \nabla(a \nabla T^{m+1}) \text{ в } \Omega \quad (6)$$

с граничными условиями $T^{m+1}(x, y) = \mu^{m+1}$ на границе $\partial\Omega$.

В вариационной постановке эта задача в пространстве $L^2(0, t_{\text{end}}; H^1(\Omega))$ принимает вид

$$\int_{\Omega} \left\{ \frac{T^{m+1} - T^m}{\tau} v + a \nabla T^{m+1} \cdot \nabla v \right\} + \int_{\partial\Omega} \mu^{m+1} v = 0, \quad (7)$$

где $v \in H^1(\Omega)$ – произвольная функция.

Данную задачу решали методом конечных элементов с триангуляцией области Ω . В результате решение получали в виде конечно-элементной аппроксимации T_h^m функции температуры. На этой сетке решалось уравнение кинетики реакций термомеханической деструкции полимера.

В соответствии с упрощенной моделью пиролиза резин, предложенной в [18], кинетика данного процесса описывается тремя необратимыми реакциями, протекающими в конденсированной фазе. Хотя в результате пиролиза резин образуется более сотни различных химических соединений, выделить их в индивидуальном виде представляется затруднительным, в связи с чем

на практике в производственных установках пиролиза резиновых отходов образующуюся парогазовую смесь путем конденсации разделяют на три фракции углеводородов, различающихся интервалами температур кипения [19]. Таким образом, ход трех брутто-реакций, отвечающих каждой фракции углеводородов, можно представить в виде дифференциальных уравнений формальной кинетики:

$$\frac{d\alpha_i}{dt} = (1 - \alpha_i) A_i \exp(-E_i / RT(t)), \quad (8)$$

где α_i – степень конверсии реагента i -й реакции ($\alpha_i = (m_0 - m)/m_0$, m – масса); A_i , E_i – предэкспоненциальные множители и энергии активации реакций соответственно; R – универсальная газовая постоянная; $T(t)$ – зависимость температуры от времени в соответствующей точке сечения реактора.

Общую зависимость массы деструктируемого полимера от времени в относительных единицах $c(t)$ описывали как взвешенную сумму функций $\alpha_i(t)$ трех групп соединений:

$$c(t) = \sum_i b_i \alpha_i(t), \quad (9)$$

где b_i – относительная доля каждой группы ($\sum_i b_i = 1$).

Параметры реакций были подобраны так, чтобы характер изменения доли оставшегося твердого вещества соответствовал экспериментальным данным, представленным в [20]. В результате были получены оценки параметров, значения которых представлены в таблице.

Оценки кинетических параметров реакций деструкции отходов резины

Номер реакции, i	b_i	$A_i, \text{с}^{-1}$	$E_i, \text{кДж/моль}$
1	0,2	1.0E6	60
2	0,6	1.0E11	150
3	0,2	4.0E16	250

Дифференциальные уравнения кинетики деструкции (8) решали численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка на сетке T_h^m функций температуры.

Результаты исследования. На рис. 3, 4 в качестве примера приведены рассчитанные распределения температуры $T(x, y)$ и общей конверсии полимера $c(x, y)$ по сечению реторты после часа прогрева реактора диаметром 0,5 м.

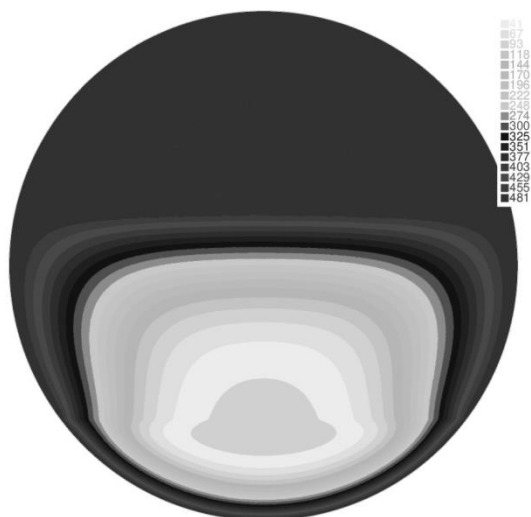


Рис. 3. Распределение температуры по сечению реторты реактора диаметром 0,5 м после часа прогрева

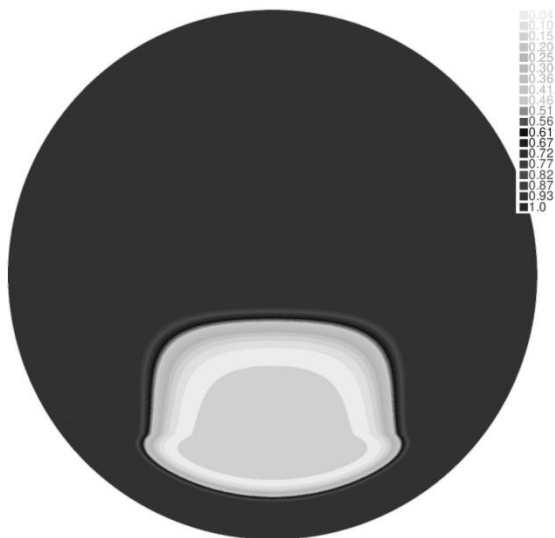


Рис. 4. Распределение степени конверсии полимера по сечению реторты реактора диаметром 0,5 м после часа прогрева

Анализ полученных результатов (рис. 3, 4) показывает, что распределения не симметричны, что является следствием рассмотренного случая неоднородной загрузки реактора, при которой коэффициент температуропроводности несимметрично распределен по сечению реторты в соответствии с формулой (5). Такой способ загрузки используется в производстве, когда в одном реакторе осуществляется переработка разного вида отходов. В случае однородной загрузки реактора данные распределения были бы симметричными относительно оси OZ реторты и для моделирования процесса

достаточно было бы решения одномерной пространственной задачи с учетом цилиндрической симметрии реактора.

На практике размеры пиролизных реакторов достаточно сильно варьируются [21–23]. Так, цилиндрические лабораторные реакторы могут иметь диаметры до 0,2 м, диаметры опытно-промышленных реакторов варьируются в пределах от 0,3 до 1 м, промышленные реакторы имеют диаметры выше 1 м. При этом лабораторные реакторы обычно неподвижные, тогда как опытно-промышленные реакторы могут быть как неподвижными, так и вращающимися.

Представляло интерес оценить влияние диаметра реактора на кинетику реакции деструкции полимерного материала.

На рис. 5 приведены кинетические кривые термодеструкции полимера, рассчитанные для реакторов разных диаметров при одинаковой скорости нагрева с поверхности.

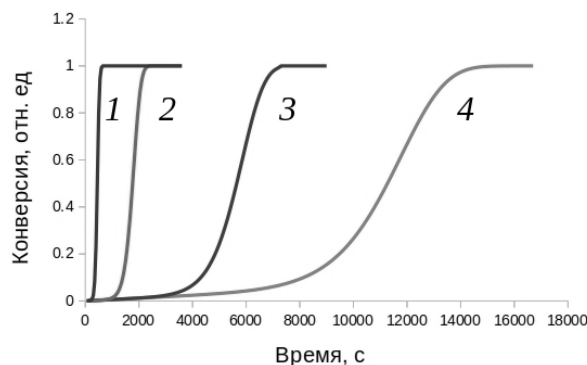


Рис. 5. Зависимость конверсии полимера в центре реактора от времени прогрева в реакторах разных диаметров (м): 1 – 0,2; 2 – 0,5; 3 – 1,0; 4 – 1,5

В реакторе диаметром 0,2 м (лабораторный тип) кинетическая кривая конверсии почти совпадает с кинетической кривой нагрева стенки (4), что позволяет в таких реакторах изучать кинетику реакций деструкции различных полимерных материалов. Однако в реакторах диаметром 0,5 м и выше время прогрева материала становится лимитирующим процессом, так что общее время реакции составляет 6 и более часов, в зависимости от диаметра реактора и степени его загрузки.

Необходимо отметить, что в приведенных расчетах не учитывалось перемешивание материала вследствие вращения реактора. В связи с этим полученные результаты в полной мере соответствуют

лишь неподвижным реакторам. Для вращающихся производственных реакторов при полной их загрузке перемешивание не происходит до тех пор, пока не прореагирует около половины материала отходов, вследствие чего появится свободный объем для их относительного перемещения. Анализ кривых конверсии (рис. 5) показывает, что для этого требуется более половины времени реакции. С учетом того что вращение реторты осуществляется достаточно медленно, можно заключить, что в этот период рассмотренная модель будет справедлива. После того как реагирующий материал приобретет достаточную степень свободы для возможного перемешивания, появляется возможность более быстрого перераспределения температуры и ускорения реакции. Данный процесс нами не учитывался, поскольку в этом случае, помимо уравнений теплопроводности и химической кинетики, необходимо решать существенно более сложную задачу механики сыпучего материала (уравнения механики сыпучих сред).

Выводы. Параметры представленной математической модели процесса пиролиза изношенных автомобильных шин и резиновых отходов в горизонтальном цилиндрическом реакторе были выбраны на основе анализа процесса пиролиза в реальном опытно-промышленном реакторе и литературных данных по кинетике деструкции резин. Предложенная математическая модель процесса пиролиза включает уравнение теплопроводности, решаемое численно методом конечных элементов в двумерной постановке, и систему дифференциальных уравнений кинетики пиролиза, решаемую на сеточной функции, описывающей распределение температуры по сечению реактора.

На основе анализа работы реального реактора сделан вывод о том, что предложенная математическая модель описывает первую, лимитирующую стадию его работы, когда процесс внутреннего перемешивания материала за счет вращения реактора отсутствует. На примере решения уравнений модели для реакторов разного диаметра продемонстрировано влияние размеров реактора на длительность реального производственного процесса, определяемую стадией прогрева материала при отсутствии его перемешивания.

Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования кинетики деструкции материала при заданных

условиях нагрева реактора, что может быть полезным при конструировании реакторов и автоматизации управления процессом.

Список литературы

1. **An Overview** of Rubber Recycling / S. Bandyopadhyay, S.L. Agrawal, R. Ameta, et al. // *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*. – 2008. – Vol. 24, No. 2. – P. 73–112. DOI.org/10.1177/147776060802400201.
2. **Kaminsky W., Mennerich C., Zhang Z.** Feedstock recycling of synthetic and natural rubber by pyrolysis in a fluidized bed // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2009. – Vol. 85, No. 1–2. – P. 334–337. DOI.org/10.1016/j.jaap.2008.11.012.
3. **Waste** tyre pyrolysis – Impact of the process and its products on the environment / D. Czajczyńska, K. Czajka, R. Krzyżyńska, H. Jouhara // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2020. – Vol. 20. – P. 100690. DOI.org/10.1016/j.tsep.2020.100690.
4. **Хожиева Р.Б., Хайитов Р.Р.** Исследование процесса получения углеводородов из резиновых отходов // *Universum: технические науки: электрон. научн. журн.* – 2021. – Вып. 6(87). – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11903>
5. **Чич С.К.** Пиролиз как оптимальный метод утилизации отработанных автомобильных шин // *Новые технологии*. – 2009. – № 3. – С. 23–27.
6. **Папин А.В., Игнатова А.Ю., Макаревич Е.А.** Пути утилизации отработанных автошин и анализ возможности использования технического углерода пиролиза отработанных автошин // *Вестник КузГТУ*. – 2015. – № 2(108). – С. 96–100.
7. **Исследование** физико-химических характеристик твердого остатка пиролиза резинотехнических изделий / О.В. Касьянова, Д.С. Шапранко, Ю.Н. Дудникова, З.Р. Исмагилов // *Вестник КузГТУ*. – 2019. – № 2(132). – С. 101–110.
8. **The Development** of a Waste Tyre Pyrolysis Production Plant Business Model for the Gauteng Region, South Africa / N. Nkosi, E. Muzenda, T.A. Mamvura, et al. // *Processes*. – 2020. – Vol. 8, No. 7. – P. 766–774. DOI.org/10.3390/pr8070766.
9. **Rani S., Agnihotri R.** Recycling of scrap tyres // *International Journal of Materials Science and Applications*. – 2014. – Vol. 3, No. 5. – P. 164–167. DOI.org/10.11648/j.ijmsa.20140305.16.
10. **Opportunities** and barriers for producing high quality fuels from the pyrolysis of scrap tires / I. Hita, M. Arabiourrutia, M. Olazar, et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 56. – P. 745–759. DOI.org/10.1016/j.rser.2015.11.081.
11. **Демьянова В.С., Камбург В.Г., Дяркин Р.А.** Моделирование процесса утилизации продуктов переработки изношенных автомобильных шин в промышленности строительных материалов // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – № 2/10(56). – С. 50–52.

12. **Гусев А.Д., Петухова Н.А., Карпунин Г.А.** К вопросу переработки изношенных автомобильных шин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 6. – С. 11–14.

13. **Моделирование** процесса переработки изношенных автомобильных шин при их утилизации / И.В. Лучин, И.Н. Кравченко, М.Ю. Конкин, И.А. Золотов // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 6. – С. 20–24.

14. **Собкалов А.В., Пименова М.А., Ивахнюк Г.К.** Математическое моделирование окислительного пиролиза автошин в барабанных печах // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2013. – № 4. – С. 49–58.

15. **Попов С.К., Ванюшкин В.Д., Валинчева А.А.** Моделирование и исследование процесса охлаждения твердых продуктов пиролиза отработанных шин // Вестник МЭИ. – 2020. – № 6. – С. 18–28. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-18-28.

16. **Суханов О.И., Жагфаров Ф.Г., Ишмурзин А.А.** Моделирование процесса утилизации отходов // НефтеГазоХимия. – 2021. – № 3–4. – С. 66–73. DOI:10.24412/2310-8266-2021-3-4-66-73.

17. **Моделирование** процесса пиролиза резин на основе нейросетей / Т.Б. Минигалиев, В.П. Дорожкин, О.А. Коробейникова, С.Н. Гусев // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 11. – С. 195–200.

18. **Липанов А.М., Болкисев А.А.** О моделировании термического разложения полибутадиена с учетом образования полимерного каркаса // Химическая физика и мезоскопия. – 2013. – Т. 15, № 2. – С. 236–241.

19. **Моделирование** кинетики термодеструкции резин при пиролизе резиновых отходов / М.Е. Соловьев, В.Ф. Каблов, С.Л. Балдаев, М.О. Федорова // От химии к технологии шаг за шагом. – 2023. – Т. 4, вып. 1. – С. 70–85. – URL: <http://chemintech.ru/index.php/tor/2023-4-1>

20. **Kinetic** study of the effect of the heating rate on the waste tyre pyrolysis to maximise limonene production / N.M. Mkhize, B. Danon, P. van der Gryp, J.F. Görgens // Chemical Engineering Research and Design. – 2019. – Vol. 152. – P. 363–371. DOI.org/10.1016/j.cherd.2019.09.036.

21. **Dick D.T., Agboola O., Ayeni A.O.** Pyrolysis of waste tyre for high-quality fuel products: A review // AIMS Energy. – 2020. – No. 8(5). – P. 869–895. DOI: 10.3934/energy.2020.5.869.

22. **A Review** on the Thermochemical Recycling of Waste Tyres to Oil for Automobile Engine Application / M.I. Jahirul, F.M. Hossain, M.G. Rasul, A.A. Chowdhury // Energies. – 2021. – No. 14(13). – P. 3837. DOI.org/10.3390/en14133837.

23. **Lewandowski W.M., Januszewicz K., Kosakowski W.** Efficiency and proportions of waste tyre pyrolysis products depending on the re-

actor type – A review // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2019. – Vol. 140. – P. 25–53. DOI.org/10.1016/j.jaap.2019.03.018.

References

1. Bandyopadhyay, S., Agrawal, S.L., Ameta, R., Dasgupta, S., Mukhopadhyay, R., Deuri, A.S., Suresh, C. An Overview of Rubber Recycling. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 2008, vol. 24, no. 2, pp. 73–112. DOI.org/10.1177/147776060802400201.

2. Kaminsky, W., Mennerich, C., Zhang, Z. Feedstock recycling of synthetic and natural rubber by pyrolysis in a fluidized bed. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009, vol. 85, no. 1–2, pp. 334–337. DOI.org/10.1016/j.jaap.2008.11.012.

3. Czajczyńska, D., Czajka, K., Krzyżyńska, R., Jouhara, H. Waste tire pyrolysis – Impact of the process and its products on the environment. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 20, p. 100690. DOI.org/10.1016/j.tsep.2020.100690.

4. Khozhieva, R.B., Khayitov, R.R. Issledovanie protsesssa polucheniya uglevodorodov iz rezinovykh otkhodov [Study of the process of obtaining hydrocarbons from rubber waste]. *Universum: tekhnicheskie nauki: elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2021, issue 6(87). Available at: <https://7univer-sum.com/ru/tech/archive/item/11903>

5. Chich, S.K. Piroлиз kak optimal'nyy metod utilizatsii otrabotannykh avtomobil'nykh shin [Pyrolysis as an optimal method for recycling waste tires]. *Novye tekhnologii*, 2009, no. 3, pp. 23–27.

6. Papin, A.V., Ignatova, A.Yu., Makarevich, E.A. Puti utilizatsii otrabotannykh avtoshin i analiz vozmozhnosti ispol'zovaniya tekhnicheskogo ugleroda piroliza otrabotannykh avtoshin [Ways of recycling waste tires and analysis of the possibility of using carbon black for pyrolysis of used tires]. *Vestnik KuzGTU*, 2015, no. 2(108), pp. 96–100.

7. Kas'yanova, O.V., Shapranko, D.S., Dudnikova, Yu.N., Ismagilov, Z.R. Issledovanie fiziko-khimicheskikh kharakteristik tverdogo ostatka piroliza rezino-tekhnicheskikh izdeliy [Study of the physico-chemical characteristics of the solid residue of pyrolysis of rubber products]. *Vestnik KuzGTU*, 2019, no. 2(132), pp. 101–110.

8. Nkosi, N., Muzenda, E., Mamvura, T.A., Belaid, M., Patel, B. The Development of a Waste Tire Pyrolysis Production Plant Business Model for the Gauteng Region, South Africa. *Processes*, 2020, vol. 8, no. 7, pp. 766–774. DOI.org/10.3390/pr8070766.

9. Rani, S., Agnihotri, R. Recycling of scrap tires. *International Journal of Materials Science and Applications*, 2014, vol. 3, no. 5, pp. 164–167. DOI.org/10.11648/j.ijmsa.20140305.16.

10. Hita, I., Arabiourrutia, M., Olazar, M., Bilbao, J., Arandes, J.M., Sánchez, P.C. Opportunities and barriers for producing high quality fuels from the pyrolysis of scrap tires. *Renewable and Sustainable*

Energy Reviews, 2016, vol. 56, pp. 745–759. DOI.org/10.1016/j.rser.2015.11.081.

11. Dem'yanova, V.S., Kamburg, V.G., Dyar'kin, R.A. Modelirovanie protsessa utilizatsii produktov pererabotki iznoshennykh avtomobil'nykh shin v promyshlennosti stroitel'nykh materialov [Modeling the process of recycling products from the processing of worn-out tires in the construction materials industry]. *East European Journal of Advanced Technologies*, 2012, no. 2/10(56), pp. 50–52.

12. Gusev, A.D., Petukhova, N.A., Karpukhin, G.A. K voprosu pererabotki iznoshennykh avtomobil'nykh shin [On the issue of recycling worn-out tires]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*, 2014, no. 6, pp. 11–14.

13. Luchin, I.V., Kravchenko, I.N., Konkin, M.Yu., Zolotov, I.A. Modelirovanie protsessa pererabotki iznoshennykh avtomobil'nykh shin pri ikh utilizatsii [Modeling the process of recycling used car tires during their disposal]. *Modern science-intensive technologies*, 2014, no. 6, pp. 20–24.

14. Sobkalov, A.V., Pimenova, M.A., Ivakhnyuk, G.K. Matematicheskoe modelirovanie okislitel'nogo piroliza avtoshin v barabannykh pechakh [Mathematical modeling of oxidative pyrolysis of tires in drum furnaces]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii*, 2013, no. 4, pp. 49–58.

15. Popov, S.K., Vanyushkin, V.D., Valineeva, A.A. Modelirovanie i issledovanie protsessa okhlazhdeniya tverdykh produktov piroliza otrabotannykh shin [Modeling and research of the cooling process of solid products of pyrolysis of used tires]. *Vestnik MEI*, 2020, no. 6, pp. 18–28. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-18-28.

16. Sukhanov, O.I., Zhagfarov, F.G., Ishmurzin, A.A. Modelirovanie protsessa utilizatsii otkhodov [Modeling the waste disposal process]. *NefteGazoKhimiya*, 2021, no. 3–4, pp. 66–73. DOI: 10.24412/2310-8266-2021-3-4-66-73.

17. Minigaliev, T.B., Dorozhkin, V.P., Korobeynikova, O.A., Gusev, S.N. Modelirovanie

protsessa piroliza rezin na osnove neyrosetey [Modeling the process of rubber pyrolysis based on neural networks]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2010, no. 11, pp. 195–200.

18. Lipanov, A.M., Bolkisev, A.A. O modelirovanii termicheskogo razlozheniya polibutadiena s uchetom obrazovaniya polimernogo karkasa [On modeling the thermal decomposition of polybutadiene taking into account the formation of a polymer framework]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*, 2013, vol. 15, no. 2, pp. 236–241.

19. Solov'ev, M.E., Kablov, V.F., Baldaev, S.L., Fedorova, M.O. Modelirovanie kinetiki termodestruksii rezin pri pirolize rezinovykh otkhodov [Modeling the kinetics of thermal destruction of rubber during pyrolysis of rubber waste]. *Ot khimii k tekhnologii shag za shagom*, 2023, vol. 4, no. 1, pp. 70–85. Available at: <http://chemintech.ru/index.php/tor/2023-4-1>

20. Mkhize, N.M., Danon, B., van der Gryp, P., Görgens, J.F. Kinetic study of the effect of the heating rate on the waste tire pyrolysis to maximize limonene production. *Chemical Engineering Research and Design*, 2019, vol. 152, pp. 363–371. DOI.org/10.1016/j.cherd.2019.09.036.

21. Dick, D.T., Agboola, O., Ayeni, A.O. Pyrolysis of waste tyre for high-quality fuel products: A review. *AIMS Energy*, 2020, no. 8(5), pp. 869–895. DOI: 10.3934/energy.2020.5.869.

22. Jahirul, M.I., Hossain, F.M., Rasul, M.G., Chowdhury, A.A. A Review on the Thermochemical Recycling of Waste Tyres to Oil for Automobile Engine Application. *Energies*, 2021, no. 14(13), p. 3837. DOI.org/10.3390/en14133837.

23. Lewandowski, W.M., Januszewicz, K., Kosakowski, W. Efficiency and proportions of waste tyre pyrolysis products depending on the reactor type: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2019, vol. 140, pp. 25–53. DOI.org/10.1016/j.jaap.2019.03.018.

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 2

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 11.04.2024. Выход в свет 30.04.2024. Формат 60x84 ¹/₈.
Усл. печ. л. 11,62. Уч.-изд. л. 12,4. 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