ВЫПУСК 4

ISSN 2072-2672

# ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

2023

ИГЭУ

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 2023 / Вып. 4

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. Клюнина,** 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 **С.В. Клюнина**
Технический редактор **Н.В. Королева**
Редактор **С.М. Коткова**

## СОДЕРЖАНИЕ

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА**

**Д.С. Шарыгин, А.А. Яблоков, Г.А. Филатова.** Многофакторное автоматизированное исследование методов определения места повреждения на модели воздушной линии электропередачи 500 кВ.....**5**

**А.В. Охлопков, В.Д. Битней.** Подтверждение необходимости и целесообразности применения различных методик интерпретации результатов газохроматографического анализа силовых трансформаторов.....**18**

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА**

**А.И. Тихонов, А.А. Каржевин, А.В. Стулов, Д.М. Тихомиров, В.Е. Розин.** Технология построения имитационных моделей силовых трансформаторов с произвольной конструкцией активной части.....**28**

**И.С. Полющенков.** Разработка контроллера электромеханического датчика положения.....**36**

**В.Н. Караулов, А.Ф. Доржинкевич.** Параметрическая модель синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором в установившихся и переходных режимах.....**46**

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

**А.М. Аббясов, С.В. Тарарыкин.** Синтез робастной системы управления транспортированием длинномерного материала на основе грамианного метода.....**54**

**А.Б. Виноградов, К.К. Ермаков, А.А. Коротков.** Удаленная работа с комплектом тягового электрооборудования карьерного самосвала.....**63**

**Л.Г. Зотов, И.М. Большаков.** Энергоэффективный конденсаторный DC-DC преобразователь для автономной системы электроснабжения.....**70**

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ**

**В.П. Жуков, А.Н. Беляков, А.В. Огурцов, А.С. Шмелев, Д.С. Бараковских, С.И. Шувалов.** Моделирование и оптимизация регулярных многоступенчатых многопродуктовых гравитационных классификаторов.....**77**

**К.Н. Бубнов, В.П. Жуков, А.В. Голубев, Е.В. Барочкин, С.И. Шувалов.** Система непрерывного мониторинга технического состояния и оперативной диагностики паровой турбины.....**85**

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**В.А. Нечаев, С.В. Косяков.** Метод разработки моделей распознавания речи для использования в информационных системах энергетики.....**94**

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

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

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

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

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 2023 / Issue 4

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

**EDITORIAL BOARD:**

**G.V. Ledukhovsky,** 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 **S.V. Klyunina**
Technical Editor **N.V. Koroleva**
Editor **S.M. Kotкova**

## CONTENT

**ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

**D.S. Sharygin, A.A. Yablokov, G.A. Filatova.** Multifactorial automated research of fault location methods based on model of 500 kV overhead power line.....**5**

**A.V. Okhlopkov, V.D. Bitney.** Confirmation of necessity and applicability of using various methods of interpretation of results of gas chromatographic analysis of power transformers.....**18**

**ELECTROMECHANICS**

**A.I. Tikhonov, A.A. Karzhevin, A.V. Stulov, D.M. Tikhomirov, V.E. Rozin.** Technology for simulation models of power transformers with arbitrary design of active part.....**28**

**I.S. Polyuschenkov.** Development of controller for electromechanical position sensor.....**36**

**V.N. Karaulov, A.F. Dorzhinkevich.** Parametric model of synchronous reluctance motor with TLA-rotor in steady-state and transient modes.....**46**

**AUTOMATION CONTROL SYSTEMS**

**A.M. Abbyasov, S.V. Tararykin.** Synthesis of robust control system for transportation of long-length material based on Gramian method.....**54**

**A.B. Vinogradov, K.K. Ermakov, A.A. Korotkov.** Remote work with a set of traction electrical equipment for mine dump truck.....**63**

**L.G. Zotov, I.M. Bolshakov.** Energy efficient capacitor DC-DC converter for autonomous power supply system.....**70**

**MATHEMATICAL METHODS IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY**

**V.P. Zhukov, A.N. Belyakov, A.V. Ogurtsov, A.S. Shmelev, D.S. Barakovskikh, S.I. Shuvalov**. Modeling and optimization of regular multi-stage multi-product gravity classifiers.....**77**

**K.N. Bubnov, V.P. Zhukov, A.V. Golubev, E.V. Barochkin, S.I. Shuvalov**. System for continuous monitoring of technical condition and maintenance diagnostics of steam turbine.....**85**

**COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGIES**

**V.A. Nechaev, S.V. Kosyakov.** Development of automatic speech recognition model for energy facilities.....**94**

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

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

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

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

# ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.3.018.782.3

**Дмитрий Сергеевич Шарыгин**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры АУЭС, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-06, e-mail: sharyginds@yandex.ru

**Андрей Анатольевич Яблоков**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры АУЭС, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-06, e-mail: andrewyablokov@yandex.ru

**Галина Андреевна Филатова**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры АУЭС, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-06, e-mail: fgala90@mail.ru

## Многофакторное автоматизированное исследование методов определения места повреждения на модели воздушной линии электропередачи 500 кВ

**Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Одним из основных средств автоматизации объектов электроэнергетики является определение места повреждения на воздушных линиях электропередачи. Своевременное устранение и организация ремонтно-восстановительных работ для ввода линий электропередачи в работу требуют высокой точности определения места повреждения. В ИГЭУ разработаны методы определения места повреждения по параметрам аварийного режима, использующие данные от электронных (цифровых комбинированных или оптических) измерительных трансформаторов. Применение электронных трансформаторов позволяет снизить инструментальную погрешность определения места повреждения за счет точных замеров электрических величин при КЗ, включая замер производной первичного тока. Целью исследования методов определения места повреждения, разработанных коллективом ИГЭУ, является оценка погрешностей данных методов при вариации множества влияющих на расчет удаленности места повреждения факторов в автоматизированном режиме с применением современных средств моделирования.
**Материалы и методы.** Многофакторное автоматизированное исследование методов определения места повреждения выполнено с использованием имитационной модели сети сверхвысокого напряжения в программном комплексе Matlab+Simulink. В качестве исследуемых методов определения места повреждения выбраны односторонний и двусторонний методы по параметрам аварийного режима, разработанные в ИГЭУ. Изменения значений факторов, влияющих на замер места повреждения, в том числе на параметры моделей элементов сети, произведены при помощи программы на языке MATLAB с выполнением параллельных расчетов на разных ядрах процессора.
**Результаты.** Разработана методика автоматизированного исследования методов определения места повреждения, включающая модель электрической сети сверхвысокого напряжения в Simulink и программу управления имитационной моделью в Matlab. Проведено более 100 000 вычислительных экспериментов для каждого метода определения места повреждения. По данным исследования, в двустороннем методе определения места повреждения исключено влияние переходного сопротивления, практически отсутствует влияние частоты сети, а также уменьшено, по сравнению с односторонним методом определения места повреждения, влияние изменений параметров линий электропере-

© Шарыгин Д.С., Яблоков А.А., Филатова Г.А., 2023
Вестник ИГЭУ, 2023, вып. 4, с. 5–17.

дачи и эквивалентных систем. В результате исследования алгоритмов определения места повреждения по методу Монте-Карло установлено, что погрешности одностороннего определения места повреждения не соответствуют требованиям стандартов ПАО «ФСК ЕЭС» менее чем в 20 % случаев, а погрешности двустороннего определения места повреждения при тех же условиях моделирования не соответствуют требованиям стандарта только в 1 % случаев.
**Выводы.** Разработанная методика исследования позволяет оценить точность методов определения места повреждения при изменении множества влияющих на замер факторов в автоматизированном режиме. Выполненные по разработанной методике исследования одностороннего и двустороннего методов определения места повреждения по параметрам аварийного режима на основе данных от электронных трансформаторов показали достаточную точность на модели воздушной линии электропередачи 500 кВ при изменении отдельных влияющих на замер места повреждения факторов и при случайном задании множества параметров модели сети.

**Ключевые слова:** определение места повреждения, параметры аварийного режима, электронный трансформатор, цифровой комбинированный трансформатор тока и напряжения, оптический измерительный трансформатор, имитационное моделирование

**Dmitriy Sergeevich Sharygin**
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-06, e-mail: sharyginds@yandex.ru

**Andrey Anatolievich Yablokov**
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-06, e-mail: andrewyablokov@yandex.ru

**Galina Andreevna Filatova**
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-06, e-mail: fgala90@mail.ru

# Multifactorial automated research of fault location methods based on model of 500 kV overhead power line

**Abstract**

**Background.** Fault location is one of the main means of automation of electric power on overhead power lines. Well-timed elimination and organization of maintenance and repair work to put power lines into operation require high accuracy of fault location. Fault location methods based on the parameters of emergency mode using data of electronic (digital or optical) instrument transformers have been developed in Ivanovo State Power Engineering University (ISPU). The use of electronic transformers makes it possible to reduce the instrumental error of fault location due to accurate measurements of electrical quantities during short circuit, including the measurement of the derivative of the primary current. The aim of the study of fault location methods developed by the ISPU team is to evaluate the errors of these methods with a variation of many factors affecting the calculation of fault location in an automated mode using modern modeling tools.
**Materials and methods.** A multifactorial automated research of the fault location methods is carried out using a simulation model of an ultra-high voltage network in the Matlab + Simulink software package. One-sided and two-sided fault location methods based on the parameters of emergency mode developed in ISPU are chosen as the studied methods. In the research methodology presented in the article, the values of the factors affecting the measurement of fault location, including the parameters of the network element models, are changed using a program in the MATLAB language with parallel calculations performed on different processor cores.
**Results.** A technique for automated research of fault location methods has been developed including a model of an ultra-high voltage electrical network in Simulink and a simulation model control program in Matlab. More than 100,000 computational experiments have been carried out for each fault location method. According to the study, the influence of transient resistance is excluded, and the influence of the network frequency is practically absent in the two-sided method. The change in the parameters of power transmission lines and equivalent systems is less affected in comparison with the one-sided method. The Monte Carlo method of fault location algorithms has shown that the errors of one-sided method do not meet the requirements of PJSC «FGC UES» standards in less than 20% of cases, and the errors of the two-sided method under the same modeling conditions do not meet the requirements only in 1% of cases.
**Conclusions.** The developed research methodology makes it possible to evaluate the accuracy of fault location methods when changing the set of factors influencing the measurement in an automated mode. The carried-out research of one-sided and two-sided fault location methods based on emergency mode parameters and data of electronic transformers has showed sufficient accuracy on the model of a 500 kV overhead power transmission line with changes in individual factors affecting the measurement of fault location and when randomly setting a set of parameters of the network model.

**Key words:** fault location, emergency mode parameters, electronic transformer, digital current and voltage transformer, optical instrument transformer, simulation modeling

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.4.005-017

**Введение.** Определение места повреждения (ОМП) линий электропередачи (ЛЭП) является одним из наиболее важных средств автоматизации на объектах электроэнергетики. Повреждения, возникающие на воздушных магистральных линиях электропередачи, приводят к выходу ЛЭП из работы, в результате чего имеет место недоотпуск электроэнергии, снижение надежности и качества электроснабжения. Кроме того, они могут привести к системным авариям и нарушению устойчивости энергосистемы. В таких случаях требуется срочная организация ремонтно-восстановительных работ службами предприятий электросетей.

Согласно требованиям и стандартам эксплуатирующих организаций (ПАО «Россети»)[1], максимальная зона обхода (осмотра) ЛЭП в зависимости от протяженности линии и наличия двустороннего замера токов и напряжений составляет от ±2,5 до ±15 % длины линии на основе показаний устройств дистанционного ОМП. Для выполнения этой операции затрачивается в среднем 8–10 ч, но в отдельных случаях это время может достигать нескольких суток[2]. В связи с этим повышение точности существующих методов ОМП, а также разработка новых является перспективной и актуальной задачей.

Актуальность задачи подтверждается также проведением большого количества исследований по данной тематике [1–7]. При этом большая часть работ посвящена разработке и исследованию методов ОМП, основанных на измерении параметров аварийного режима (ПАР) [1, 2, 4].

На методическую погрешность ОМП [8] по ПАР оказывают влияние такие факторы, как удаленность повреждения, переходное сопротивление, сопротивление нагрузки, соотношение сопротивлений ЛЭП и эквивалентных систем, сдвиг фаз между электродвижущими силами (ЭДС) систем и др. Кроме параметров схемы сети и условий возникновения повреждения на точность ОМП существенное влияние оказывает инструментальная погрешность. При больших кратностях тока КЗ и наличии в нем апериодической составляющей полная погрешность электромагнитных трансформаторов тока (ТТ) может превышать 10 % вследствие насыщения магнитопровода ТТ.

Однако во многих работах по ОМП рассматривается ограниченный набор влияющих на точность замера факторов [4–7]. Исследования погрешностей метода ОМП при наличии отдельных влияющих на замер факторов не могут в полной мере отразить возможность его применения на реальных объектах электроэнергетики. Низкая выборка, небольшая вариация параметров, ограниченность диапазонов исследований, не учет влияния эффектов насыщения и новых технологий не позволяют достоверно говорить о точности ОМП.

Применение первичного высоковольтного оборудования с встроенной микропроцессорной техникой и использование цифровых протоколов передачи данных в электроэнергетике открыло новые возможности для разработки и совершенствования методов ОМП.

В ИГЭУ разработаны методы ОМП по ПАР на основе данных от электронных измерительных [9–12], цифровых комбинированных (рис. 1) или оптических (рис. 2) трансформаторов.

Рис. 1. Внешний вид и устройство цифрового комбинированного измерительного трансформатора

Рис. 2. Внешний вид и устройство оптического измерительного трансформатора (АЦП – аналогово-цифровой преобразователь)

[1] СТО 56947007-29.240.55.159-2013. Типовая инструкция по организации работ для определения мест повреждений воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше.

[2] Мазуров А. Представлен проект нового принципа ОМП: одно устройство на секцию шин [Электронный ресурс]. – URL: http://digitalsubstation.com/blog/2017/08/31/predstavlen-proekt-novogo-printsipa-omp-odno-ustrojstvo-na-nbsp-sektsiyu-shin/ (Дата обращения: 14.10.2022).

Цифровые комбинированные и оптические трансформаторы имеют следующие особенности, которые приводят к уменьшению инструментальной погрешности ОМП:

1) преобразование токов в широком диапазоне амплитудных значений с нормируемой погрешностью[3];

2) воспроизведение формы тока без искажения (отсутствие явления насыщения магнитопровода);

3) погрешность коэффициента трансформации и угловая погрешность ЦТТН меньше, чем у электромагнитных ТТ, в том числе при преобразовании токов, частота которых превышает промышленную.

Комбинированные цифровые трансформаторы (см. рис. 1) имеют в своем составе нетрадиционные первичные преобразователи тока, не подверженные явлениям насыщения и остаточной намагниченности (катушки Роговского или оптические датчики), преобразователи напряжения (например, резистивный или емкостный делитель) и электронный блок [13].

Электронный блок трансформатора может передавать информацию об ОМП при реализации логического узла RFLO на уровень станции цифровой подстанции по протоколу MMS (IEC 61850-8-1)[4]. Реализация методов ОМП непосредственно в электронном блоке трансформатора позволяет дополнить данные о месте повреждения, получаемые от микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики (РЗА) и регистраторов аварийных событий.

Нормированные частоты передачи мгновенных значений от цифровых трансформаторов тока и напряжения, в соответствии со стандартом IEC 61869-9[5], составляют 96 выборок в секунду для РЗА и коммерческого учета (КУ) и 288 выборок в секунду для определения показателей качества электроэнергии. Внутренняя частота дискретизации аналого-цифровыми преобразователям электронных трансформаторов обычно выше частоты передачи кадров данных (например, 1152 (12 x 96 или 4 x 288) выборок на период промышленной частоты), что может быть использовано в методах ОМП, требующих большого числа выборок, например волновых или использующих производные первичных токов [14].

На основе электронных измерительных трансформаторов могут быть реализованы как односторонние методы ОМП, так и двусторонние по ПАР [15] при использовании маршрутизируемых выборочных значений (R-SV). Высокая частота дискретизации АЦП трансформаторов, отсутствие эффектов остаточной намагниченности и насыщения, высокая точность преобразования тока позволяют без погрешностей определять первичные величины при КЗ, в том числе производную тока [16].

Целью исследования является разработка методики и исследование погрешностей одностороннего и двустороннего методов ОМП по ПАР, разработанных в ИГЭУ, при вариации множества искажающих замер факторов.

**Методы исследования.** Расчетные формулы для одностороннего и двустороннего ОМП имеют следующий вид [16–18]:

$$L_{\text{КЗ}} = \frac{u_A}{i_A r_1 + \frac{di_A}{dt} l_1 + \frac{d3i_0}{dt}\left(\frac{l_0}{l_1} - 1\right)\frac{1}{3}}; \quad (1)$$

$$L_{\text{КЗ}} = \frac{(u_{A1} - u_{A2}) + r_1 i_{A2} + L_1 \frac{di_{A2}}{dt} + R_e \cdot 3i_{02} + L_e \frac{d3i_{02}}{dt}}{r_1(i_{A1} - i_{A2}) + l_1\left(\frac{di_{A1}}{dt} + \frac{di_{A2}}{dt}\right) + r_e(3i_{01} - 3i_{02}) + l_e\left(\frac{d3i_{01}}{dt} + \frac{d3i_{02}}{dt}\right)}, \quad (2)$$

где $L_{\text{КЗ}}$ – место замыкания на землю; $u_A$ – мгновенное фазное напряжение; $u_{A1(2)}$ – мгновенное фазное напряжение стороны 1(2); $i_A$ – мгновенный фазный ток; $i_{A1(2)}$ – мгновенный фазный ток стороны 1(2); $di_A/dt$ – производная фазного тока; $di_{A1(2)}/dt$ – производная фазного тока стороны 1(2); $3i_{01(2)}$ – мгновенное значение тока нулевой последовательности (НП) стороны 1(2); $d3i_0/dt$ – производная тока НП; $d3i_{01(2)}/dt$ – производная тока НП стороны 1(2); $r_1$ – удельное сопротивление линии прямой последовательности (ПП); $l_1$ – удельная индуктивность линии ПП; $l_0$ – удельная индуктивность линии НП; $R_1$ – сопротивление линии ПП; $R_0$ – сопротивление линии НП; $L_1$ – индуктивность линии ПП; $L_0$ – индуктивность линии НП; $L$ – длина линии; $R_e = (R_0 - R_1)/3$ – коэффициент компенсации активного сопротивления НП; $L_e = (L_0 - L_1)/3$ – коэффициент компенсации индуктивного сопротивления НП; $r_e = R_e/L$ – удельный коэффициент компенсации активного сопротивления НП; $l_e = L_e/L$ – удельный коэффициент компенсации индуктивного сопротивления НП.

Исследования методов ОМП проведены для однофазного короткого замыкания на землю как наиболее часто встречающегося повреждения на ЛЭП, в том числе, в сетях сверхвысокого напряжения 330–750 кВ.

[3] ГОСТ Р МЭК 60044-8-2010. Трансформаторы измерительные. Ч. 8. Электронные трансформаторы тока. – М.: Стандартинформ, 2012.

[4] IEC 61850-8-1. Communication networks and systems for power utility automation – Part 8-1: Specific communication service mapping (SCSM) – Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3, International Standard, Edition 2.

[5] IEC 61869-9. Instrument Transformers – Part 9: Digital Interface for Instrumental Transformers, 2016.

Схема исследуемой сети 500 кВ [19] представлена на рис. 3. Имитационная модель сети в программном комплексе Matlab+Simulink для определения погрешности исследуемых методов ОМП показана на рис. 4. Параметры модели электрической сети взяты из [19].

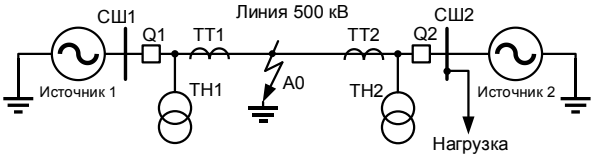



Рис. 3. Схема исследуемой электрической сети 500 кВ

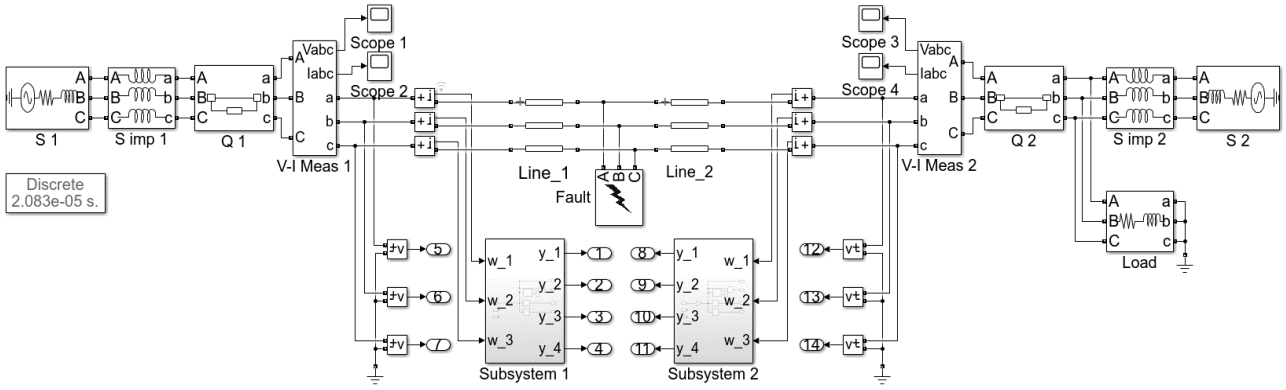



Рис. 4. Имитационная модель сети 500 кВ в Simulink

Основные номинальные параметры элементов исследуемой сети представлены в табл. 1, 2 [19].

Таблица 1. **Параметры эквивалентных источников мощности**

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Сопротивление прямой последовательности (Источник 1) | 1,61 Ом |
| Индуктивность прямой последовательности (Источник 1) | 0,11 Гн |
| Сопротивление нулевой последовательности (Источник 1) | 3,21 Ом |
| Индуктивность нулевой последовательности (Источник 1) | 0,22 Гн |
| Сопротивление прямой последовательности (Источник 2) | 3,21 Ом |
| Индуктивность прямой последовательности (Источник 2) | 0,06 Гн |
| Индуктивность нулевой последовательности (Источник 2) | 6,42 Ом |
| Индуктивность прямой последовательности (Источник 2) | 0,19 Гн |
| Разность углов между векторами ЭДС источников | 15 град. |

Линия электропередачи представлена моделью с распределенными параметрами. Параметры, представленные в табл. 2, рассчитаны для фазного провода марки АС-400/51, грозозащитного троса марки АСУС-70/72.

Несмотря на то что модель ЛЭП содержит емкости (табл. 2, $C_1$ и $C_0$), в расчетные формулы (1) и (2) емкости не входят. Однако, согласно результатам проведенных исследований, наличие емкостей и представление ЛЭП моделью с распределенными параметрами не влияет на точность разработанных методов ОМП [13, 14, 16].

Таблица 2. **Параметры ЛЭП**

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Удельное сопротивление прямой последовательности $r_1$ | 0,025 Ом/км |
| Удельное сопротивление нулевой последовательности $r_0$ | 0,21 Ом/км |
| Удельная индуктивность прямой последовательности $l_1$ | 0,001 Гн/км |
| Удельная индуктивность нулевой последовательности $l_0$ | 0,0023 Гн/км |
| Удельная емкость прямой последовательности $c_1$ | 1,21e-08 Ф/км |
| Удельная емкость нулевой последовательности $c_0$ | 8,38e-09 Ф/км |
| Длина ЛЭП $L$ | 220 км |

Замеры фазных токов и напряжений производятся с обоих концов линии (рис. 3, измерительные трансформаторы ТТ1, ТН1 и ТТ2, ТН2). Утроенные токи нулевой последовательности получены как суммы фазных токов каждой стороны, измеренные высокоточными электронными ТТ. Электронные трансформаторы представлялись идеальными первичными преобразователями с моделью АЦП [15].

Имитационная модель электрической сети 500 кВ управляется кодом, написанным на языке Matlab. В исследуемую модель посредством кода задаются:

– параметры моделей объектов сети;

– количество отсчетов АЦП трансформатора на период;

– количество итераций для функции, изменяющиеся параметры, их диапазоны и шаги варьирования (табл. 3);

– условия возникновения КЗ (например, переходное сопротивление в месте КЗ, угол между векторами ЭДС систем и др.), которые, по желанию пользователя, не варьируются.

Таблица 3. **Влияющие на замер факторы**

| Фактор | Интервал варьирования |
|---|---|
| Удаленность КЗ, км | [0, 20,…,220] |
| Переходное сопротивление *R*, Ом | [0 …50] |
| Изменение индуктивности и активного сопротивления системы С1 относительно индуктивности и активного сопротивления системы С2 по ПП и НП | $\left\lfloor \frac{L_{C1(1)}, R_{C1(1)}}{L_{C2(1)}, R_{C2(1)}} \right\rfloor =$ = [0.1, 0.2, ..., 1] |
| | $\left\lfloor \frac{L_{C1(0)}, R_{C1(0)}}{L_{C2(0)}, R_{C2(0)}} \right\rfloor =$ = [0.1, 0.2, ..., 1] |
| Разность углов между векторами ЭДС источников, градусы | [0, 10, …, 90] |
| Изменение индуктивности и активного сопротивления нагрузки относительно начального значения | [0,1·*L*нагр, 0,1·*R*нагр… *L*нагр, *R*нагр] |
| Изменения удельных параметров линий от номинальных значений [19], % | $R_1$ = [70, 80, …, 160] |
| | $R_0$ = [70, 80, …, 160] |
| | $L_1$ = [100, 101, …, 110] |
| | $L_0$ = [100, 101, …, 110] |
| | $C_1$ = [100, 101, …, 110] |
| | $C_0$ = [100, 101, …, 110] |
| Изменение частоты сети, Гц | [49.5, 49.6, …, 50.5] |

Диапазон изменения переходного сопротивления соответствует стандарту организации ПАО «Россети»[6]. Изменение индуктивности и активного сопротивления системы С1 относительно индуктивности и активного сопротивления системы С2 взято в процентах исходя из возможных режимов максимума и минимума нагрузки, различий схемно-режимной ситуаций и др. Индуктивности и активное сопротивление изменялись при этом одинаково, например: в модели устанавливались значения 0,5 $R_{C1(1)}$ и 0,5 $L_{C1(1)}$. Изменение угла между ЭДС систем принято по условию статической устойчивости. Диапазоны варьирования параметров ЛЭП приняты из ранее проводимых исследований [20]. Также принято возможное изменением частоты в системе с учетом действия автоматической частотной разгрузки (АЧР) и системной автоматики.

[6] СТО 34.01-4.1-001-2016. Устройства определения места повреждения воздушных линий электропередачи. Общие технические требования.

Диапазоны варьирования отдельных факторов могут быть уменьшены или увеличены, например, при необходимости расширения границ исследования.

Для каждого набора параметров производится вычисление места повреждения по формулам (1) и (2) в соответствии с блок-схемой на рис. 5. Оценка погрешностей метода ОМП производится для каждой итерации изменяющегося фактора. В завершении цикла выводятся структуры данных со значениями места повреждения, вычисленных погрешностей и графики зависимостей (например, зависимостей значений относительных погрешностей ОМП от изменения значений искажающего замер фактора).

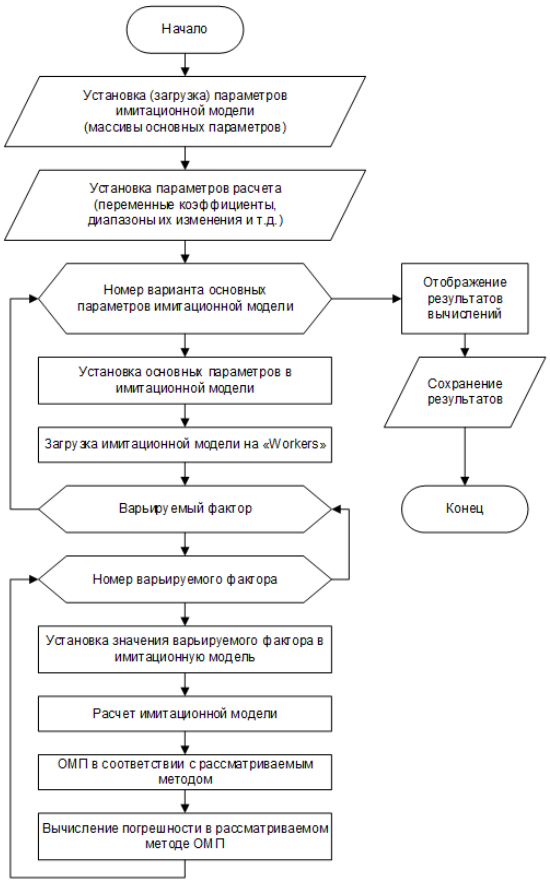



Рис. 5. Блок-схема реализации подхода для исследуемого метода

Расчет модели можно производить параллельно на нескольких ядрах процессора. Это позволяет значительно ускорить расчет при множественных вариациях параметров и большом количестве выполняемых итераций.

Для (1) и (2) производная тока может вычисляться посредством обработки получаемого от оптического или цифрового ТТ сигнала с большой частотой дискретизации или может быть получена напрямую с нетрадиционных преобразователей (например, катушки Роговского).

**Обработка результатов вычислений.** Особенность рассматриваемого метода вычисления расстояния до места повреждения заключается в том, что расчет по формулам (1) и (2) желательно выполнять в моменты перехода тока короткого замыкания через ноль для уменьшения влияния переходного сопротивления в месте КЗ.

При одностороннем замере для выполнения расчета используются замеры электрических величин в моменты перехода тока нулевой последовательности, измеренного со стороны Источника 1 (рис. 3), поскольку этот ток практически совпадает по фазе с током нулевой последовательности в месте повреждения. Для данной модели расхождение по углу между токами в месте замера и в месте повреждения практически не влияло на точность одностороннего ОМП при переходном сопротивлении до 40 Ом (рис. 6).

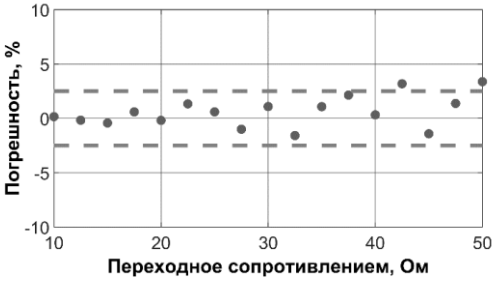



Рис. 6. Погрешности одностороннего ОМП при вариации переходного сопротивления от 10 до 50 Ом

При этом для двустороннего замера влияние переходного сопротивления практически исключено, поскольку возможен точный расчет тока в месте повреждения и более точное определение моментов перехода тока через ноль (рис. 7).

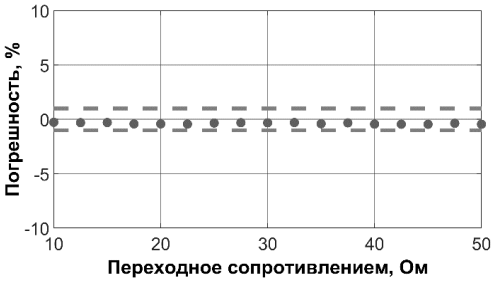



Рис. 7. Погрешности двустороннего ОМП при вариации переходного сопротивления от 10 до 50 Ом

Оценка определения места повреждения производится по 3 периодам промышленной частоты (60 мс), что соответствует минимальному интервалу времени с момента возникновения КЗ до момента отключения выключателя в сетях класса напряжения 500 кВ (полное время отключения элегазового выключателя 500 кВ составляет $t_{О.В} \approx 40 \div 50$ мс, время срабатывания алгоритма быстродействующей защиты ЛЭП – $t_{РЗ} \approx 20 \div 25$ мс).

Определение погрешности метода при каждом переходе тока через ноль дает представление о точности каждого замера, но не дает понятия о точности метода ОМП в целом. Для оценки точности метода ОМП необходима обработка всех замеров при переходах тока через ноль.

Для оценки погрешности ОМП использовалась интервальная оценка. Данный метод заключается в том, что вся длина линии делится на части (интервалы) и выбирается интервал, в который попало наибольшее количество замеров с определением места повреждения. Далее находится среднеарифметическое значение из всех замеров, которые попали в заданный интервал.

В данном исследовании было принято деление длины ЛЭП на 10 интервалов, что обеспечило достаточную точность оценки каждого замера и при этом не оказывало влияния на время вычислений.

Использование нетрадиционных преобразователей (катушек Роговского) или трансформаторов, правильно воспроизводящих апериодическую составляющую тока КЗ, дает заметное преимущество перед обычными электромагнитными трансформаторами тока. На рис. 8 показаны графики токов КЗ, где более темным цветом показана синусоида тока с апериодической составляющей, полученная от нетрадиционного трансформатора. Вторая синусоида – сигнал от электромагнитного ТТ класса TPZ, не имеющего насыщения от апериодической составляющей тока КЗ, но не трансформирующего ее в полной мере (крайний случай – трансформатор не передает апериодическую составляющую совсем). Рис. 9 иллюстрирует погрешности в момент каждого перехода тока через ноль при одностороннем ОМП. Использование в алгоритме осциллограммы тока КЗ с правильно восстановленной апериодической составляющей дает заметное преимущество и заметно повышает точность метода ОМП.

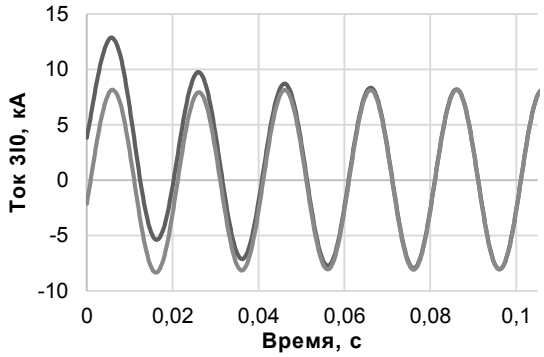



Рис. 8. Осциллограммы токов КЗ с апериодической составляющей (темная линия) и без нее (светлая линия)

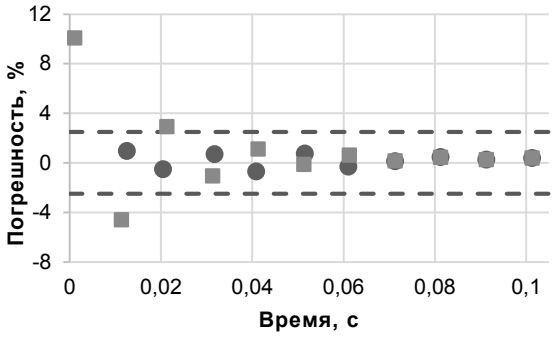



Рис. 9. Погрешности отдельных замеров при использовании тока КЗ в обработке сигнала с апериодической составляющей (окружности) и без нее (квадраты)

**Результаты исследования.** В соответствии со стандартом организации ПАО «ФСК ЕЭС»[7], расчетная погрешность определения расстояния до места повреждения при одностороннем измерении по ПАР не должна превышать 2,5 %, а при двустороннем – 1 %. Для параметрического ОМП с учетом погрешностей электромагнитных ТТ и ТН такой погрешности можно достичь только по методической составляющей погрешности, без учета инструментальной.

***Результаты исследований алгоритмов одностороннего и двустороннего замеров по ПАР и их оценка.*** Первой серией экспериментов был определен оптимальный вариант реализации алгоритма по числу выборок АЦП измерительного трансформатора. Исследования одностороннего метода ОМП при частоте дискретизации тока и напряжения, равной 24 выборки на период промышленной частоты (используется в большинстве микропроцессорных терминалов релейной защиты), показали, что погрешности ОМП превосходят десятки процентов от длины линии. В связи с этим исследуемый метод не мог и не может применяться при такой частоте дискретизации.

Исследования одностороннего и двустороннего методов ОМП при частоте дискретизации тока и напряжения, равной 96 выборок на период промышленной частоты (в соответствии с корпоративным профилем МЭК 61850 ПАО «ФСК ЕЭС»[8] и стандартом IEC 61869-9[9]), показали, что в среднем погрешность при всех влияющих на замер факторах составляет менее 2 %.

При реализации метода непосредственно в электронном блоке трансформатора возможно использование большего числа выборок. При 1152 выборках на период промышленной частоты наблюдается заметное улучшение значений погрешностей при всех влияющих на замер факторов. Однако, учитывая, что в настоящее время ОМП реализуется в отдельных устройствах, а также расчетные погрешности ОМП, дальнейшие результаты представлены для ОМП одностороннего и двустороннего замеров с использованием 96 выборок на период.

Исследовалось влияние следующих факторов (см. табл. 3).

1. *Удаленность КЗ* (рис. 10, 11). Погрешности одностороннего и двустороннего ОМП находятся в пределах допустимых по СТО «Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА» погрешностей (показаны на рисунках пунктирными линиями). Погрешности одностороннего ОМП выше при большей удаленности КЗ.

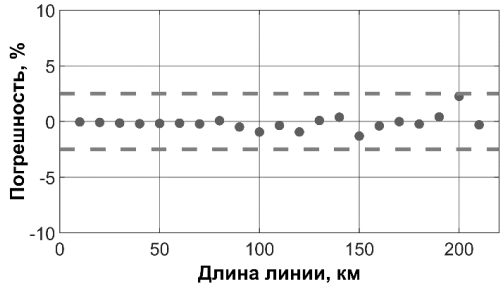



Рис. 10. Погрешности одностороннего ОМП при вариации удаленности КЗ

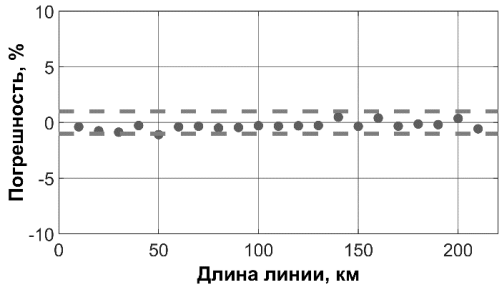



Рис. 11. Погрешности двустороннего ОМП при вариации удаленности КЗ

2. *Переходное сопротивление* (рис. 6, 7). Погрешность одностороннего метода ОМП увеличивается с увеличением переходного сопротивления и незначительно выходит за пределы допустимых погрешностей при значениях переходного сопротивления в несколько десятков Ом, что является типичным для одностороннего замера. Двусторонний метод ОМП не имеет данного недостатка и его точность не зависит от переходного сопротивления.

3. *Изменение сопротивления системы по прямой (ПП) и нулевой (НП) последовательностям* (рис. 12, 13, в процентах при неизменной частоте 50 Гц). Погрешности одностороннего и двустороннего методов ОМП находятся в пределах допустимых значений. Данный фактор не оказывает значительного влияния на точность ОМП. Графики изменения погрешностей представлены только для вариации сопротивления системы по ПП, так как характер изменения по-

[7] СТО 56947007 – 29.120.70.241-2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА.
[8] СТО 56947007 – 25.040.30.309-2020. Корпоративный профиль МЭК 61850 ПАО «ФСК ЕЭС».
[9] IEC 61869-9 Instrument Transformers – Part 9: Digital Interface for Instrumental Transformers, 2016.

грешности при вариации по НП аналогичный и погрешность не выходит за допустимые пределы.

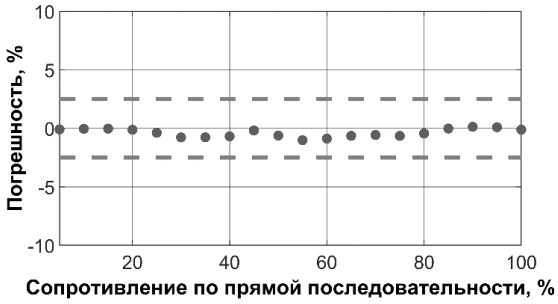



Рис. 12. Погрешности одностороннего ОМП при вариации сопротивления системы (Источник 2) по прямой последовательности (в %-ном соотношении к Источник 1)

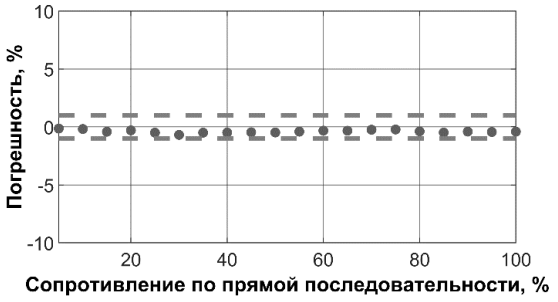



Рис. 13. Погрешности двустороннего ОМП при вариации сопротивления системы (Источник 2) по прямой последовательности (в %-ном соотношении к Источник 1)

4. *Сдвиг фазы между системами* (рис. 14, 15). Увеличение значения угла системы «Источник 2» по отношению к системе «Источник 1» до 40° и более приводит к незначительному выходу погрешности за пределы допустимых значений.

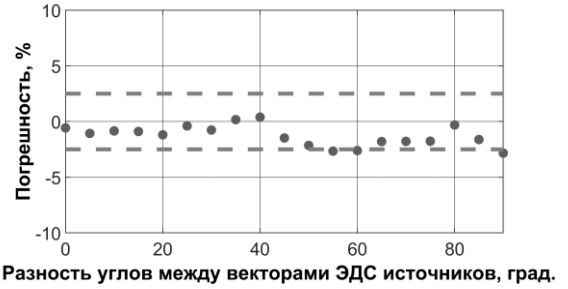



Рис. 14. Погрешности одностороннего ОМП при вариации угла сдвига фазы эквивалентной системы (Источник 2)

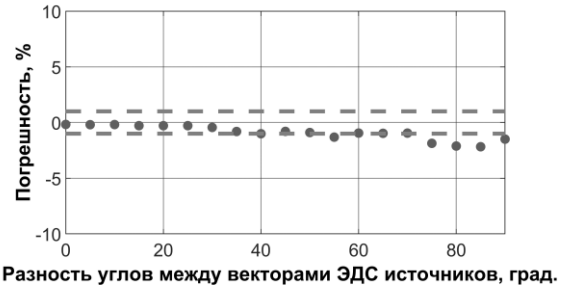



Рис. 15. Погрешности двустороннего ОМП при вариации угла сдвига фазы эквивалентной системы (Источник 2)

5. *Сопротивление нагрузки* (рис. 16, 17, в процентах от начального значения при неизменной частоте 50 Гц). Погрешности одностороннего и двустороннего методов ОМП находятся в пределах допустимых значений. Данный фактор не оказывает значительного влияния на точность ОМП.

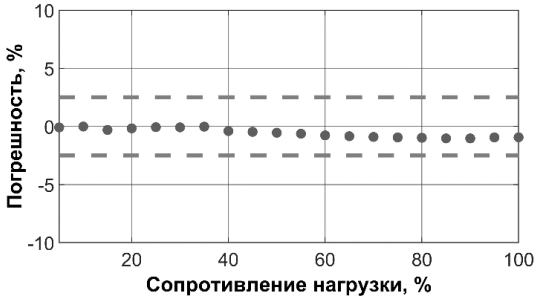



Рис. 16. Погрешности одностороннего ОМП при вариации сопротивления нагрузки

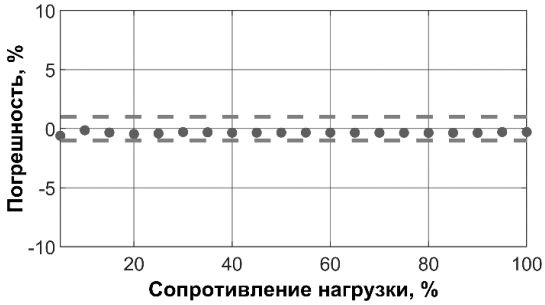



Рис. 17. Погрешности двустороннего ОМП при вариации сопротивления нагрузки

6. *Изменение удельных параметров линий от номинальных* (рассчитанных для данной конфигурации ЛЭП и приведенных в [19]) значений (рис. 18, 19). Изменение данных параметров по отдельности (например, только индуктивностей) не влияет на точность ОМП при двустороннем методе ОМП. На односторонний метод незначительное влияние оказывают индуктивности ЛЭП по ПП и НП ($L_1$ и $L_0$). В обоих случаях наблюдается увеличение погрешности метода при увеличении индуктивностей. Изменение остальных параметров не приводит к значительному искажению точности ОМП, и погрешности находятся в пределах допустимых значений.

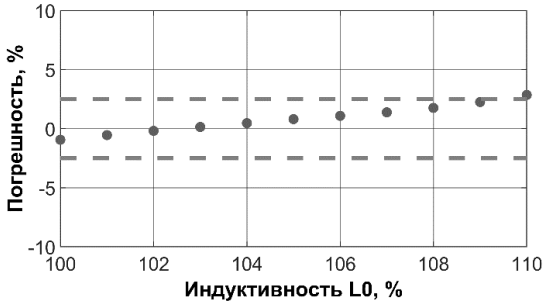



Рис. 18. Погрешности одностороннего ОМП при вариации индуктивности линии по нулевой последовательности *L*0

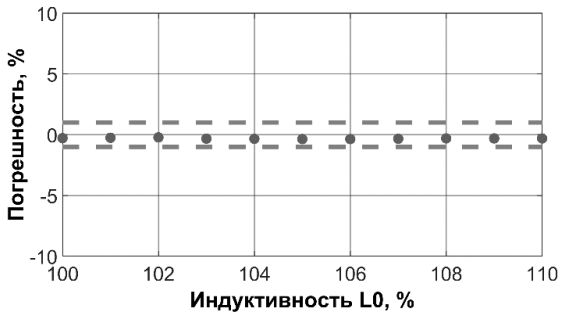



Рис. 19. Погрешности двустороннего ОМП при вариации индуктивности линии по нулевой последовательности *L*0

7. *Изменение частоты сети* (рис. 20, 21). Изменение частоты сети не приводит к увеличению погрешности методов ОМП.

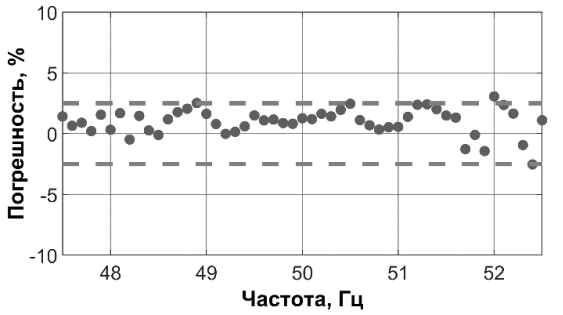



Рис. 20. Погрешности одностороннего ОМП при вариации частоты сети

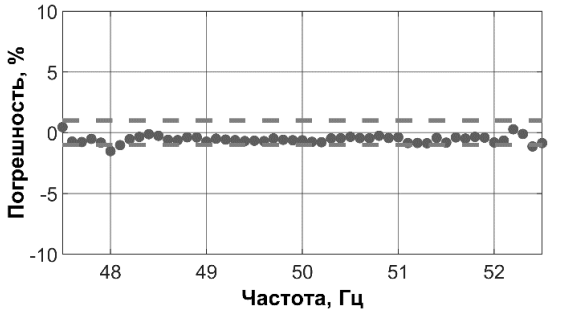



Рис. 21. Погрешности двустороннего ОМП при вариации частоты сети

Анализ полученных данных (рис. 8–21) показывает, что двусторонний метод ОМП точнее одностороннего: исключено влияние переходного сопротивления; практически отсутствует влияние частоты сети; в меньшей степени влияет изменение удельных параметров ЛЭП и соотношение сопротивлений эквивалентных систем; не влияет сопротивление нагрузки. Выход за рамки допустимых значений существует только при некоторых критических значениях параметров, например при большой разности углов между векторами ЭДС источников.

Отдельно исследовалось влияние на точность ОМП неточного задания удельных параметров линии, которые в зависимости от внешних условий (например, погодных) могут изменяться на несколько процентов совместно [20].

В модели изменялись сразу все удельные параметры ЛЭП, активные и индуктивные, при этом их значения варьировались в соответствии с методом Монте-Карло. На рис. 22 показана зависимость погрешностей одностороннего метода ОМП при случайном задании удельных параметров линии. Отклонение от реальных значений сразу нескольких параметров может приводить к увеличению погрешностей до 4–5 %. Для точного ОМП необходимо использовать действительные (замеренные, а не паспортные) параметры ЛЭП. Их определение является отдельной задачей.

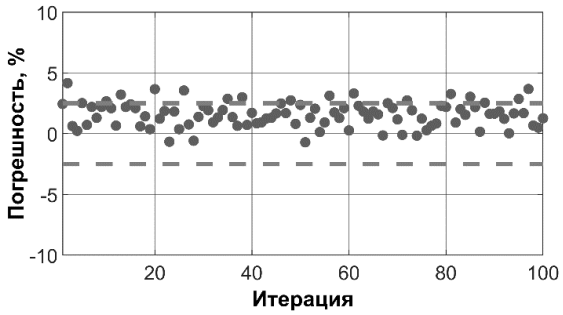



Рис. 22. Погрешности одностороннего ОМП при вариации удельных параметров линии по методу Монте-Карло

На рис. 23 показано, что при двустороннем методе ОМП и вариативном задании удельных параметров ЛЭП и при различных сочетаниях этих параметров точность ОМП приблизительно всегда одинакова. Но при этом появляется дополнительная погрешность, которая выводит метод за пределы требуемых значений.

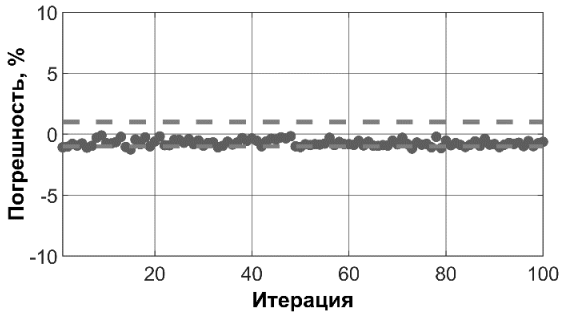



Рис. 23. Погрешности двустороннего ОМП при вариации удельных параметров линии по методу Монте-Карло

В целях получения данных по возможной величине погрешности исследуемых методов ОМП были проведены исследования при изменении случайным образом всех искажающих замер факторов. Всего для исследования было проведено 100 тыс. вычислительных экспериментов для каждого из алгоритмов. При этом удельные параметры ЛЭП приняты неизменными в соответствии с табл. 2.

На рис. 24, 25 представлены графики погрешностей ОМП при задании влияющих на замер факторов случайным образом по методу Монте-Карло.

Погрешность одностороннего ОМП не соответствует требованиям НТД менее чем в 20 % случаев (рис. 24). Двустороннее ОМП при таких же условиях моделирования работает в 99 % случаев точно, т.е. имеет погрешности ОМП менее 1 %, что является хорошим показателем (рис. 25).

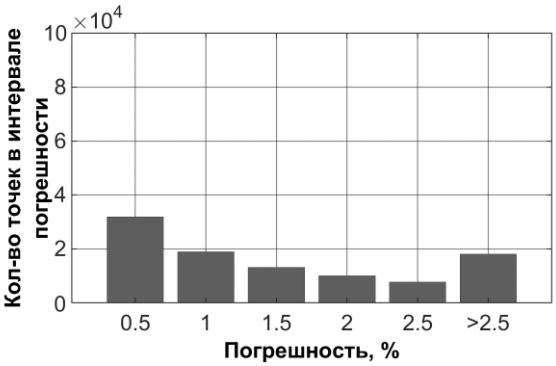



Рис. 24. Погрешности одностороннего ОМП по методу Монте-Карло с заданием уточненных параметров варьирования факторов

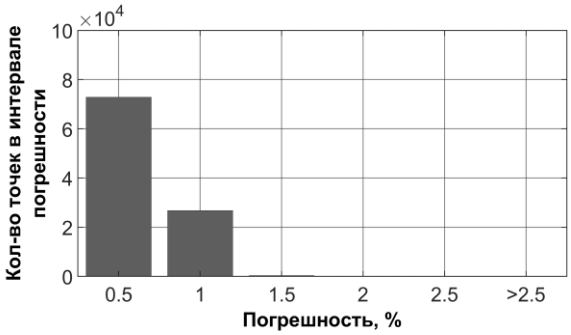



Рис. 25. Погрешности двустороннего ОМП по методу Монте-Карло с заданием уточненных параметров варьирования факторов

**Выводы.** Методика исследования одностороннего и двустороннего ОМП в сетях сверхвысокого напряжения на основе имитационной модели сети в Simulink позволяет проводить испытания в автоматизированном режиме при вариации различных параметров модели сети.

Выполненные по разработанной методике исследования зависимостей погрешностей от отдельных искажающих замер факторов, а также комплексное исследование способов при случайном задании факторов (100 тыс. вычислительных экспериментов для каждого метода ОМП) с использованием одностороннего и двустороннего методов ОМП на основе данных от электронных трансформаторов показали достаточную точность алгоритмов ОМП, а также большую точность двустороннего метода ОМП по сравнению с односторонним.

Одностороннее ОМП также имеет приемлемые показатели точности при вариации различных влияющих на замер факторов. Но существуют сочетания факторов, при которых показатели ОМП не входят в границы допустимых погрешностей, например большая удаленность места замыкания от места взятия замера, большие переходные сопротивления, большие разности углов между векторами ЭДС источников.

**Список литературы**

1. **Гура Д.Н., Корольков А.Л.** Сравнение традиционных и волнового методов определения места повреждения по итогам натурных испытаний на ЛЭП 220–330 кВ // Материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Электроэнергетика глазами молодежи – 2017», Самара, 02–06 октября 2017 г. – Самара, 2017. – С. 415–418.

2. **Guerra W., Kagan N.** Fault Location and Voltage Estimation in Transmission Systems by Evolutionary Algorithms // 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems. – 2009. DOI:10.1109/ISAP.2009.5352871.

3. **Asynchronous** Fault Location in Transmission Lines Considering Accurate Variation of the Ground-Mode Traveling Wave Velocity / R. Liang, Z. Yang, N. Peng, et al. // Energies. – 2017. – Vol. 10. – P. 1957. DOI:10.3390/en10121957.

4. **Подшивалин А.Н., Исмуков Г.Н.** Адаптация методов определения места повреждения к современным требованиям эксплуатации линий электропередачи [Электронный ресурс] // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 3–7 июня 2013 г. – Режим доступа: https://b-ok.org/book/3208751/87a52e.

5. **Chen X., Jiao Z.** Accurate fault location method of distributionnetwork with limited number of PMUs // Proc. 2018 China Int. Conf. Electricity Distribution (CICED). – China, 2018. – P. 1503–1507. DOI: 10.1109/CICED.2018.8592074.

6. **Gama J.R., Lopes F.V.** On compensating synchronization errors in two-terminal based fault location approaches // Proc. 2017 Workshop Commun. Netw. Power Syst. (WCNPS). – Brasília, Brazil, 2017. – P. 1–4. DOI:10.1109/WCNPS.2017.8253082.

7. **Машенков В.М.** Особенности определения места повреждения на ВЛ напряжением 110–750 кВ: учеб. пособие. – М.: Издание Центра подготовки кадров энергетики, 2005.

8. **Обалин М.Д.** Применение имитационного моделирования для адаптации алгоритмов определения места повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03. – Н. Новгород, 2016. – 181 с.

9. **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.

10. **Application** of Electronic Transformers in Digital Substation / H. Wang, G. Zhang, Z. Guo, et al. // 2008 Joint International Conference on Power System

Technology and IEEE Power India Conference. – New Delhi, India, 2008. – P. 1–5. DOI: 10.1109/ICPST.2008.4745170.

11. **Song L.** Development of a Novel DC Electricity Meter Based on New Electronic Current Transformer // 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). – Chengdu, China, 2019. – P. 1702–1705. DOI: 10.1109/ITNEC.2019.8729312.

12. **Xu K., Li J., Liu S.** A Broadband Response Model of Electronic Current Transformer Applied in Smart Grid // 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). – Beijing, China, 2020. – P. 1–4. DOI: 10.1109/ICHVE49031.2020.9280068.

13. **Lebedev V., Filatova G., Timofeev A.** Development of Remote Fault Location Method based on Synchronized Two-sided Measurement (ICEAM). – 2019. – P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8742783.

14. **Yablokov A., Filatova G., Timofeev A.** Using of non-traditional current and voltage sensors for the fault location // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 141. – P. 01058. DOI:10.1051/matecconf/201714101058

15. **Аржанников Е.А., Чухин А.М.** Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи: учеб. пособие. – Иваново, 1998. – С. 74.

16. **Yablokov A., Filatova G., Timofeev A.** Research of Methods for Fault Location Determination Using Signals from Digital Current and Voltage Transformers // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2018. – P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728880.

17. **Filatova G., Yablokov A., Timofeev A.** Research of fault location algorithm for data metering system based on digital transformers // Proc. 2019 Int. Ural Conf. Electrical Power Eng. (UralCon 2019). – 2019. – P. 433–437. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877683.

18. **Yablokov A., Filatova G., Timofeev A.** Research of the remote fault location algorithm based on sampled values for measured primary electrical quantities // Proc. Int. Theoretical Practical Conf. Alternative Smart Energy (TPCASE 2018). – Lancaster, CA: DEStech Publications, 2018. – P. 302–308. DOI: 10.12783/dteees/tpcase2018/30432.

19. **Братолюбов А.А., Иванов И.Е., Беляев П.Н.** Моделирование переходных процессов электроэнергетических систем: учеб. пособие. – Иваново, 2017. – 116 с.

20. **Иванов И.Е.** Анализ степени вариации параметров высоковольтных воздушных линий электропередачи // International research journal. – 2018. – № 12. – С. 95–100. https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.016.

## References

1. Gura, D.N., Korol'kov, A.L. Sravnenie traditsionnykh i volnovogo metodov opredeleniya mesta povrezhdeniya po itogam naturnykh ispytaniy na LEP 220–330 kV [A comparison of conventional and wave methods for fault location according to the results of the experiments of full-scaletests on power lines 220–330 kV]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi – 2017», Samara, 02–06 oktyabrya 2017* [Proceedings of the VIII International scientific and technical conference «Electric power industry through the eyes of youth – 2017», Samara, October 02–06, 2017]. Samara, 2017, pp. 415–418.

2. Guerra, W., Kagan, N. Fault Location and Voltage Estimation in Transmission Systems by Evolutionary Algorithms. 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems. Curitiba, Brazil, 2009. DOI: 10.1109/ISAP.2009.5352871.

3. Liang, R., Yang, Z., Peng, N., Liu, C., Zare, F. Asynchronous Fault Location in Transmission Lines Considering Accurate Variation of the Ground-Mode Traveling Wave Velocity. Energies, 2017, vol. 10, p. 1957. DOI: 10.3390/en10121957.

4. Podshivalin, A.N., Ismukov, G.N. Adaptatsiya metodov opredeleniya mesta povrezhdeniya k sovremennym trebovaniyam ekspluatatsii liniy elektroperedachi [Adaptation of fault location methods to modern requirements for the operation of power lines]. *Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennye napravleniya razvitiya sistem releynoy zashchity i avtomatiki energosistem», Ekaterinburg, 3–7 iyunya 2013* [Proceedings of the IV International scientific and technical conference «Modern trends in the development of relay protection systems and automation of power systems», Yekaterinburg, June 3–7, 2013]. Available at: https://b-ok.org/book/3208751/87a52e.

5. Chen, X., Jiao, Z. Accurate fault location method of distributionnetwork with limited number of PMUs. Proc. 2018 China Int.Conf. Electricity Distribution (CICED). China, 2018, pp. 1503–1507. DOI: 10.1109/CICED.2018.8592074.

6. Gama, J.R., Lopes, F.V. On compensating synchronization errors in two-terminal based fault location approaches. Proc. 2017 Workshop Commun. Netw. Power Syst. (WCNPS). Brasília, Brazil, 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/WCNPS.2017.8253082.

7. Mashenkov, V.M. *Osobennosti opredeleniya mesta povrezhdeniya na VL napryazheniem 110–750 kV* [Features of determining the location of damage on overhead lines with a voltage of 110–750 kV]. Moscow: Izdanie Tsentra podgotovki kadrov energetiki, 2005.

8. Obalin, M.D. *Primenenie imitatsionnogo modelirovaniya dlya adaptatsii algoritmov opredeleniya mesta povrezhdeniya liniy elektroperedachi po parametram avariynogo rezhima.* Diss. ... kand. tekhn. nauk [The use of simulation modeling for the adaptation of algorithms for determining the location of damage to power lines according to the parameters of the emergency mode. Cand. tech. sci. diss.]. Nizhniy Novgorod, 2016. 181 p.

9. 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. state, 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.

10. Wang, H., Zhang, G., Guo, Z., Wang, J., Cai, X. Application of Electronic Transformers in Digital Substation. 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference. New Delhi, India, 2008, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICPST.2008.4745170.

11. Song, L. Development of a Novel DC Electricity Meter Based on New Electronic Current Transformer. 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Chengdu, China, 2019, pp. 1702–1705. DOI: 10.1109/ITNEC.2019.8729312.

12. Xu, K., Li, J., Liu, S. A Broadband Response Model of Electronic Current Transformer Applied in Smart Grid. 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). Beijing, China, 2020, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICHVE49031.2020.9280068.

13. Lebedev, V., Filatova, G., Timofeev, A. Development of Remote Fault Location Method based on Synchronized Two-sided Measurement (ICEAM). 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8742783.

14. Yablokov, A., Filatova, G., Timofeev, A. Using of non-traditional current and voltage sensors for the fault location. MATEC Web of Conferences, 2017, vol. 141, p. 01058. DOI: 10.1051/matecconf/201714101058.

15. Arzhannikov, E.A., Chukhin, A.M. *Metody i pribory opredeleniya mest povrezhdeniya na liniyakh elektroperedachi* [Methods and devices for determining the location of a short circuit on lines]. Ivanovo, 1998, p. 74.

16. Yablokov, A., Filatova, G., Timofeev, A., Research of Methods for Fault Location Determination Using Signals from Digital Current and Voltage Transformers. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2018, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728880.

17. Filatova, G., Yablokov, A., Timofeev, A. Research of fault location algorithm for data metering system based on digital transformers. Proc. 2019 Int. Ural Conf. Electrical Power Eng. (UralCon 2019). 2019, pp. 433–437. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877683.

18. Yablokov, A., Filatova, G., Timofeev, A. Research of the remote fault location algorithm based on sampled values for measured primary electrical quantities. Proc. Int. Theoretical Practical Conf. Alternative Smart Energy (TPCASE 2018). Lancaster, CA: DEStech Publications, 2018, pp. 302–308. DOI: 10.12783/dteees/tpcase2018/30432.

19. Bratolyubov, A.A., Ivanov, I.E., Belyaev, P.N. *Modelirovanie perekhodnykh protsessov elektroenergeticheskikh sistem* [Modeling of transient processes of electric power systems]. Ivanovo, 2017. 116 p. EDN TDGOXV.

20. Ivanov, I.E. Analiz stepeni variatsii parametrov vysokovol'tnykh vozdushnykh liniy elektroperedachi [Investigation of the variations of overhead high voltage transmission line parameters]. *International research journal*, 2018, no. 12, pp. 95–100. https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.016.

УДК 621.311

**Андрей Владимирович Охлопков**
ПАО «Мосэнерго», начальник службы экспертизы и технического развития, Россия, Москва,
e-mail: OhlopkovAV@mosenergo.ru

**Владислав Дмитриевич Битней**
ПАО «Мосэнерго», эксперт службы экспертизы и технического развития, Россия, Москва, e-mail: BitneyVD@Mosenergo.ru

# Подтверждение необходимости и целесообразности применения различных методик интерпретации результатов газохроматографического анализа силовых трансформаторов

**Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Метод анализа растворенных в масле газов относится к одному из наиболее информативных методов раннего обнаружения дефектов в силовых маслонаполненных трансформаторах. На текущий момент заключение о состоянии трансформаторов составляется на основе методик интерпретации результатов газохроматографического анализа по РД 153-34.0-46.302-00. При этом существуют ситуации, когда данный документ не дает точных результатов анализа. В связи с этим предлагается использовать несколько методик интерпретации результатов газохроматографического анализа для получения уточненных выводов. Цель исследования состоит в обосновании необходимости применения различных методик интерпретации результатов газохроматографического анализа масла силовых трансформаторов.
**Материалы и методы.** Для анализа газовых включений использованы методики соотношения Роджерса, соотношения Дорненбурга, треугольника Дюваля, методика стандарта МЭК 60599, методика ETRA, а также методика РД 153-34.0-46.302-00, принятая в РФ. Данные методики применяются в энергетических компаниях РФ, таких как ПАО «Россети МР», ПАО «ФСК ЕЭС» и ПАО «Мосэнерго».
**Результаты.** Выявлена необходимость учета совокупности всех доступных методик на основании РД 153-34.0-46.302-00 и формирования обучающих выборок. Подтверждена необходимость использования именно совокупности методик интерпретации результатов газохроматографического анализа. Сформирован алгоритм комплексного применения описанных методик интерпретации результатов газохроматографического анализа и формирования обучающих выборок.
**Выводы.** Полученные результаты позволяют рассмотреть возможность создания программного обеспечения по комплексному применению описанных методик интерпретации результатов газохроматографического анализа и формирования обучающих выборок на основе сформированного алгоритма.

**Ключевые слова:** газохроматографический анализ, силовой маслонаполненный трансформатор, трансформаторное масло, методики интерпретации результатов газохроматографического анализа, методы формирования обучающих выборок

**Andrey Vladimirovich Okhlopkov**
PJSC “Mosenergo”, Head of Expertise and Technical Development Service, Russia, Moscow,
e-mail: OhlopkovAV@mosenergo.ru

**Vladislav Dmitrievich Bitney**
PJSC “Mosenergo”, Expert, Expertise and Technical Development Services, Russia, Moscow,
e-mail: BitneyVD@Mosenergo.ru

# Confirmation of necessity and applicability of using various methods of interpretation of results of gas chromatographic analysis of power transformers

**Abstract**

**Background.** The method of analysis of gases dissolved in oil is one of the most informative methods of early detection of defects in power oil-filled transformers. Now, the decision on the state of the transformers is based on the method of interpretation of the results of the gas chromatographic (GC) according to the guideline document RD 153-34.0-46.302-00. At the same time, there are situations when this document does not provide accurate analysis results. Thus, it is proposed to use several methods of interpreting the results of the GC to obtain refined conclusions. The purpose of the study is to substantiate the need to use various methods of interpretation of the results of gas chromatographic analysis of the oil of power transformers.

© Охлопков А.В., Битней В.Д., 2023
Вестник ИГЭУ, 2023, вып. 4, с. 18–27.

**Materials and methods.** The following methods for dissolved gas analysis have been reviewed: Rogers Ratio Method, IEC 60599 Standard Method, Doernenburg Ratio Method, Duval Triangle Method, ETRA method, as well as the guideline document RD 153-34.0-46.302-00 method adopted in the Russian Federation. These methods are implemented in various power companies of the Russian Federation, such as PJSC "Rosseti MR", PJSC "FGC UES" and PJSC "Mosenergo".
**Results.** The article reveals the need to consider the totality of all available methods and techniques based on RD 153-34.0-46.302-00 and development of training samples. The scientific novelty and significance of the conducted research lies in the confirmation of the need to use a set of methods for interpreting the results of the GC. An algorithm for the complex application of the methods described in the article for interpreting the results of the GC and training samples has been formed.
**Conclusions.** The obtained results allow us to consider the possibility to develop software for the complex application of the methods of interpretation of the results of the GC described in the article and the formation of training samples based on the developed algorithm.

**Key words:** Gas chromatographic analysis, power oil filled transformer, transformer oil, methods of interpretation of results of gas chromatographic analysis, training samples methods

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.4.018-027

**Введение.** Маслонаполненное оборудование составляет значительную долю парка коммутирующего и трансформаторного оборудования. На текущий момент доля маслонаполненных трансформаторов (ТР) в энергосистеме РФ превышает 70 % [1], что по-прежнему справедливо и для масляных выключателей [2].

Одним из способов диагностики состояния оборудования является анализ газовых включений в масле, или газохроматографический анализ (ГХА) [3]. Газы, преимущественно углеводородные соединения, такие как метан, этан, этилен, ацетилен, вместе с окисью углерода и двуокисью углерода появляются в трансформаторном масле во время работы и действуют как индикаторы неисправности. Вышеуказанные газы появляются из-за повреждений в баке ТР, таких как искрение, корона (частичные разряды), перегрев токоведущих соединений и элементов конструкции остова. Изменение концентрации газов является сигналом развития серьезного (разрушительного) внутреннего дефекта в ТР, что позволяет предотвратить его аварийный отказ. Частота отбора проб масла зависит от типа и характера развития неисправности в трансформаторе. Для формирования заключения о развитии дефекта в ТР необходимо корректно интерпретировать результаты, используя различные аналитические методики, и учитывать скорость нарастания концентрации растворенных газов.

Соответственно, прогнозирование и предупреждение аварий оборудования – одна из наиболее актуальных задач [4]. Основным вопросом, на который должны ответить результаты ГХА, является возможность или невозможность дальнейшей безопасной эксплуатации оборудования. Применение вышеуказанного анализа газовых включений в масле позволит не только сократить средства на ремонт, но и избежать многих технологических инцидентов.

Хроматографический анализ газов получил широкое распространение в силу следующих достоинств [5]:

- возможность проведения анализа без вывода силового трансформатора из работы;
- низкая стоимость в связи с возможностью проведения работы одним экспертом в короткие сроки;
- универсальность метода по отношению к силовым трансформаторам и высоковольтным вводам;
- выявление широкого спектра дефектов.

При этом вышеуказанные метод имеет ряд существенных недостатков:

- отсутствие возможности определения внешних причин увеличения концентрации растворенных газов (например, проведение сварочных работ на баке трансформатора);
- несовпадение заключений о дефекте ГХА при применении различных методик интерпретации результатов ГХА;
- наличие областей неопределенностей в методиках интерпретации результатов ГХА.

Анализ результатов ГХА осуществляется в два этапа:

1) сравнение результатов измерений с граничными значениями концентраций газов;

2) при выявлении превышений концентраций газов определяется предположительный тип и характер дефекта, степень опасности и скорость развития [6].

Дефекты, выявляемые ГХА, подразделяют на две группы:

– термические дефекты;

– разряды в изоляции.

Выделение продуктов деструкции, в том числе и газов, происходит вследствие аномального локального выделения энергии и повышения температуры при дефектах первой группы. При дефектах, которые сопровождаются электрическими разрядами, газы образуются в основном вследствие ионизационных процессов.

Таким образом, кроме термической и электрической природы дефектов, выявляемых ГХА, их вид зависит и от количества выделяемой при соответствующем процессе энергии (рис. 1).

В табл. 1 представлена взаимосвязь основных газов с наиболее характерными видами дефектов, в табл. 2 представлены допустимые уровни концентраций газовых включений в

масле трансформатора, основанные на статистических данных за годы эксплуатации, которые могут быть приняты только как ориентировочные усредненные значения. Значительное повышение уровня газа между отборами проб указывает на возникновение неисправности в оборудовании. По регламенту действий, необходимо провести незамедлительный повторный анализ масла, произвести постановку оборудования на учащенный контроль. Чтобы избежать внезапного отказа ТР требуется провести восстановительные мероприятия.

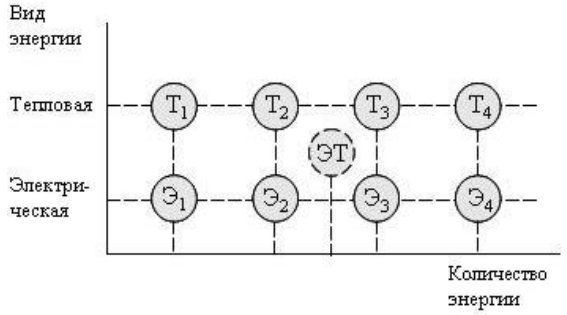



Рис. 1. Дефекты, выявляемые при проведении хроматографического анализа растворенных газов (ХАРГ): $Э_1$ – частичные разряды с низкой плотностью энергии; $Э_2$ – частичные разряды с высокой плотностью энергии; $Э_3$ – электрические разряды малой мощности; $Э_4$ – электрические разряды большой мощности; $Т_1$ – термический дефект низкой температуры (<150 °С); $Т_2$ – термический дефект в диапазоне низких температур 150–300 °С; $Т_3$ – термический дефект в диапазоне средних температур 300–700 °С; $Т_4$ – термический дефект высокой температуры (>700 °С); ЭТ – разрядный и термический дефект

Таблица 1. **Взаимосвязь основных газов с видами дефектов [7]**

| Газ | Дефект |
|---|---|
| Водород ($H_2$) | Дефекты электрического характера: частичные разряды, искровые и дуговые разряды |
| Ацетилен ($C_2H_2$) | Дефекты электрического характера: электрическая дуга, искрение |
| Этан ($C_2H_6$) | Дефекты термического характера: нагрев масла и бумажно-масляной изоляции в диапазоне температур от 300 до 400 °С |
| Метан ($CH_4$) | Дефекты термического характера: нагрев масла и бумажно-масляной изоляции в диапазоне температур от 400 до 600 °С или нагрев масла и бумажно-масляной изоляции, сопровождающийся разрядами |
| Этилен ($C_2H_4$) | Дефекты термического характера: нагрев масла и бумажно-масляной изоляции выше 600 °С |
| Угарный газ (CO) | Дефекты термического характера: старение и увлажнение масла и/или твердой изоляции |
| Углекислый газ ($CO_2$) | Дефекты термического характера: старение и увлажнение масла и/или твердой изоляции или нагрев твердой изоляции |

Таблица 2. **Типовые процентные содержания газов у трансформаторов, не имеющих дефектов (на основании статистических данных [8])**

| Газ | Допустимые процентные содержания газов в масле в зависимости от времени эксплуатации | | |
|---|---|---|---|
| | менее 4 лет, % | менее 10 лет, % | более 10 лет, % |
| Водород ($H_2$) | 0,015 | 0,030 | 0,030 |
| Ацетилен ($C_2H_2$) | 0,007 | 0,015 | 0,030 |
| Этан ($C_2H_6$) | 0,003 | 0,005 | 0,015 |
| Метан ($CH_4$) | 0,015 | 0,020 | 0,040 |
| Этилен ($C_2H_4$) | 0,005 | 0,015 | 0,100 |
| Угарный газ (CO) | 0,350 | 0,500 | 1,200 |
| Углекислый газ ($CO_2$) | 0,030 | 0,050 | 0,07 |

Использование газохроматографического анализа значительно повысило эффективность контроля состояния обмоток, например позволило отодвинуть увлажнение твердой изоляции в разряд сравнительно редких причин повреждений маслонаполненных трансформаторов, хотя еще два десятилетия назад оно занимало первое место [9].

Данные по трем трансформаторам, установленным на ТЭЦ-А и ТЭЦ-Б энергетической компании, были отобраны для анализа в связи с наличием весомых объемов результатов ГХА, накопленных в процессе эксплуатации.

**Методы исследования**. Проведем газохроматографический анализ трансформатора Т-91 марки ТРДЦН-80000/110, находящегося на ТЭЦ-А, и трансформаторов Т-98А марки ТДЦ-320000/500-У1 и АТ-2 «Ж» марки АОДЦТН-167000/500/220, которые работают на ТЭЦ-Б, с применением различных методик. Параметры ТР указаны в табл. 3.

Таблица 3. **Параметры трансформаторов, установленных на ТЭЦ-А и ТЭЦ-Б**

| Трансформатор | Марка | Тип системы охлаждения | Год ввода | Нормативный срок службы |
|---|---|---|---|---|
| Т-98А | ТДЦ-320000/500 | ДЦ | 2020 | 25 |
| АТ-2 «Ж» | АОДЦТН-167000/500/220 | ДЦ | 2016 | 25 |
| Т-91 | ТРДЦН-80000/110-69 | ДЦ | 1976 | 25 |

В табл. 4, 5, 6 приведены данные растворенных газов в маслах вышеуказанных трансформаторов. Анализ проб проводился компанией ООО «ЭЛЕГАЗЭНЕРГОСЕРВИС», в числе оборудования которой находятся хроматографы AGILENT 6890, UNICAM Series 610, «Кристалл 2000М».

Таблица 4. **Данные анализов масла трансформатора Т-98А марки ТДЦ-320000/500-У1**

| Дата анализа | $H_2$ | $CH_4$ | CO | $CO_2$ | $C_2H_4$ | $C_2H_6$ | $C_2H_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 06.10.21 | 0,040 | 0,0031 | 0,010 | 0,13 | 0,0001 | 0,0002 | 0,00005 |
| 02.11.21 | 0,052 | 0,0041 | 0,011 | 0,16 | 0,0001 | 0,0003 | 0,00005 |
| 24.11.21 | 0,05 | 0,0048 | 0,012 | 0,16 | 0,0001 | 0,0004 | 0,00005 |
| 05.01.22 | 0,047 | 0,0060 | 0,010 | 0,18 | 0,0001 | 0,0005 | 0,00005 |
| 02.02.22 | 0,060 | 0,0068 | 0,010 | 0,18 | 0,0001 | 0,0005 | 0,00005 |
| 09.02.22 | 0,053 | 0,0074 | 0,011 | 0,19 | 0,0001 | 0,0006 | 0,00005 |
| 16.02.22 | 0,054 | 0,0074 | 0,010 | 0,19 | 0,0001 | 0,0005 | 0,00005 |
| 22.02.22 | 0,065 | 0,0079 | 0,011 | 0,18 | 0,0001 | 0,0006 | 0,00005 |
| 02.03.22 | 0,060 | 0,0079 | 0,01 | 0,19 | 0,0001 | 0,0005 | 0,00005 |
| 09.03.22 | 0,073 | 0,0085 | 0,01 | 0,19 | 0,0001 | 0,0006 | 0,00005 |

Таблица 5. **Данные анализов масла трансформатора АТ-2 «Ж» марки АОДЦТН-167000/500/220**

| Дата анализа | $H_2$ | $CH_4$ | CO | $CO_2$ | $C_2H_4$ | $C_2H_6$ | $C_2H_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 06.10.21 | 0,112 | 0,1541 | 0,035 | 0,21 | 0,2709 | 0,0271 | 0,00494 |
| 07.10.21 | 0,115 | 0,1531 | 0,034 | 0,21 | 0,2647 | 0,0264 | 0,00553 |
| 08.10.21 | 0,108 | 0,1475 | 0,033 | 0,20 | 0,2597 | 0,0263 | 0,00498 |
| 11.10.21 | 0,101 | 0,1457 | 0,034 | 0,22 | 0,2510 | 0,0252 | 0,00552 |
| 13.10.21 | 0,103 | 0,1528 | 0,034 | 0,20 | 0,2694 | 0,0275 | 0,00513 |
| 20.10.21 | 0,104 | 0,1557 | 0,035 | 0,20 | 0,2728 | 0,0276 | 0,00477 |
| 01.11.21 | 0,002 | 0,0041 | 0,002 | 0,02 | 0,0121 | 0,0016 | 0,00022 |
| 10.11.21 | 0,002 | 0,0041 | 0,003 | 0,03 | 0,0107 | 0,0013 | 0,00029 |
| 17.11.21 | 0,003 | 0,0054 | 0,004 | 0,03 | 0,0131 | 0,0015 | 0,00039 |
| 24.11.21 | 0,003 | 0,006 | 0,004 | 0,05 | 0,0143 | 0,0016 | 0,00041 |
| 26.01.22 | 0,003 | 0,0068 | 0,005 | 0,07 | 0,0150 | 0,0016 | 0,00045 |
| 09.02.22 | 0,002 | 0,0065 | 0,005 | 0,08 | 0,0151 | 0,0016 | 0,00037 |
| 02.03.22 | 0,003 | 0,0066 | 0,006 | 0,08 | 0,0150 | 0,0016 | 0,00047 |
| 30.03.22 | 0,003 | 0,0071 | 0,007 | 0,11 | 0,0160 | 0,0017 | 0,00042 |
| 06.04.22 | 0.003 | 0,0071 | 0,007 | 0,10 | 0,0159 | 0,0017 | 0,00031 |
| 13.04.22 | 0,003 | 0,0068 | 0,007 | 0,10 | 0,0157 | 0,0016 | 0,00038 |
| 20.04.22 | 0,003 | 0,0072 | 0,007 | 0,10 | 0,0159 | 0,0017 | 0,00032 |

Таблица 6. **Данные анализов масла трансформатора Т-91 марки ТРДЦН-80000/110**

| Дата анализа | $H_2$ | $CH_4$ | CO | $CO_2$ | $C_2H_4$ | $C_2H_6$ | $C_2H_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 05.04.22 | 0,006 | 0,0020 | 0,023 | 0,10 | 0,0040 | 0,0002 | 0,00184 |
| 06.04.22 | 0,010 | 0,0026 | 0,032 | 0,12 | 0,0054 | 0,0002 | 0,00247 |
| 08.04.22 | 0,008 | 0,0027 | 0,030 | 0,12 | 0,0054 | 0,0002 | 0,00245 |
| 14.04.22 | 0,009 | 0,0026 | 0,033 | 0,13 | 0,0055 | 0,0002 | 0,00239 |

Работы проходили в лаборатории, аккредитованной на техническую компетентность в соответствии с требованиями ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 (аттестат аккредитации испытательной лаборатории № RA.RU.21АИ41 от 18.05.2016 г.). Различная точность результатов анализа масел трансформаторов обусловлена тем, что концентрация газа напрямую зависит как от характера неисправности, так и от типа вещества.

С использованием *методики Роджерса* [10] были получены следующие отношения концентраций газов:

1) для трансформатора Т-98А (отбор пробы масла от 06.10.2021)

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} = 0{,}5;\ \frac{CH_4}{H_2} = 0{,}078;\ \frac{C_2H_4}{C_2H_6} = 0{,}05;$$

2) для автотрансформатора АТ-2 «Ж» (отбор пробы масла от 06.10.2021)

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} = 0{,}018;\ \frac{CH_4}{H_2} = 1{,}376;\ \frac{C_2H_4}{C_2H_6} = 9{,}996;$$

3) для трансформатора Т-91 (отбор пробы масла от 05.04.2022)

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} = 0{,}46;\ \frac{CH_4}{H_2} = 0{,}33;\ \frac{C_2H_4}{C_2H_6} = 20.$$

Анализ полученных данных, а также данных [5, табл. 5.5] позволяет сделать вывод, что в трансформаторе Т-98А происходят частичные разряды. Для остальных проб масла исследование проводится аналогично. Начиная с 05.01.2022 отношение концентраций (CH_4)/H_2 превышает 0,1, из-за чего значение отношения концентрации газов на второй прямой переходит в зону между 0,1 и 1, что делает невозможным определение дефекта.

Для всех проведенных анализов проб отношения содержания газов в масле автотрансформатора АТ-2 «Ж» попадают в те же диапазоны значений, что и в анализе от 06.10.2021. Дефект, выявленный при помощи методики Роджерса, – термический, высокой температуры (> 700 °С) (см. [5, табл. 5.5]).

Для трансформатора Т-91 все отношения содержания газов в масле, полученные на основании вышеуказанных отборов проб масла за период с 05.04.2022 по 14.04.2022, находятся в тех же диапазонах, что и для пробы масла от 05.04.2022. Выявленный дефект – электрические разряды большой мощности (см. [5, табл. 5.5]).

В методике, разработанной *МЭК 60599* [11], используются аналогичные соотношения, что и в предыдущей методике. Полученные данные отображены на рис. 2, где точки (Т-98А) попадают в разные зоны на двух проекциях ($Э_1$+$Э_2$ и $T_1$+$T_2$), следовательно, можно заключить, что с помощью этого метода определить вид дефекта не представляется возможным (аналогичный результат получается при расчете для всех отборов проб масла).

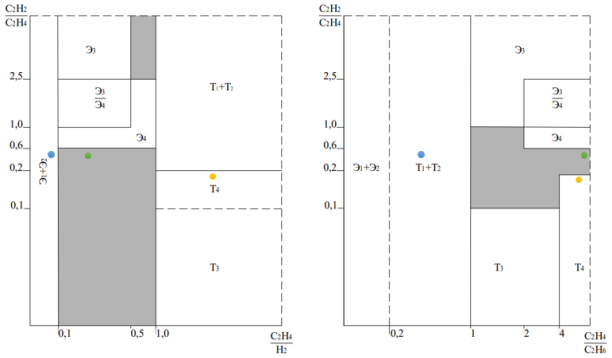



Рис. 2. Расчет концентраций газов по методике МЭК 60599

Точки в зоне Т4 соответствуют термическому дефекту высокой температуры (> 700 °С) (аналогичный результат получается при расчете для всех отборов проб масла).

Точки в закрашенной зоне означают, что с помощью данного метода определить вид дефекта не представляется возможным (аналогичный результат получается при расчете для всех отборов проб масла).

*Методика Дорненбурга* [12] рассматривает 4 соотношения:

1) для Т-98А (отбор пробы масла от 06.10.2021)

$$\frac{CH_4}{H_2} = 0{,}78;\ \frac{C_2H_2}{C_2H_4} = 0{,}5;\ \frac{C_2H_6}{C_2H_2} = 4;\ \frac{C_2H_2}{CH_4} = 0{,}016;$$

2) для АТ-2 «Ж» (отбор пробы масла от 06.10.2021)

$$\frac{CH_4}{H_2} = 1{,}376;\ \frac{C_2H_2}{C_2H_4} = 0{,}018;\ \frac{C_2H_6}{C_2H_2} = 5{,}49;$$

$$\frac{C_2H_2}{CH_4} = 0{,}03;$$

3) для Т-91 (отбор пробы масла от 05.04.2022)

$$\frac{CH_4}{H_2} = 0{,}33;\ \frac{C_2H_2}{C_2H_4} = 0{,}46;\ \frac{C_2H_6}{C_2H_2} = 0{,}11;\ \frac{C_2H_2}{CH_4} = 0{,}92.$$

Так же, как и в расчете с использованием методики Роджерса, в трансформаторе Т-98А происходят частичные разряды, но по результатам анализов, проведенных от 05.01.2022 и позднее, невозможно определить вид дефекта (табл. 7).

Анализ полученных данных (табл. 7) показывает, что в автотрансформаторе АТ-2 «Ж» наблюдается термический дефект. Аналогичный результат получается при расчете для всех отборов проб масла, проведенных для этого трансформатора.

Для трансформатора Т-91 определить вид дефекта с помощью данного метода не представляется возможным.

Таблица 7. **Корреляция дефектов со значениями отношений концентраций газов (по методике Дорненбурга)**

| Вид дефекта | $\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ | $\frac{CH_4}{H_2}$ | $\frac{C_2H_6}{C_2H_2}$ | $\frac{C_2H_2}{CH_4}$ |
|---|---|---|---|---|
| Э1 | > 0,7 | 0,1–1 | < 0,4 | > 0,3 |
| Э4 | – | < 0,1 | > 0,4 | < 0,3 |
| Т | < 0,7 | > 1 | > 0,4 | < 0,3 |

Чтобы определить дефект при помощи *треугольника Дюваля* [13, 14], необходимо рассчитать процентное содержание трех газов. Рассчитаем его для Т-98А (отбор пробы масла от 06.10.2021) и для двух других ТР (аналогично):

1) для Т-98А (отбор пробы масла от 06.10.2021):

$$\%CH_4 = \frac{CH_4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2} =$$

$$= \frac{0{,}0021}{0{,}0021 + 0{,}0001 + 0{,}00005} = 93{,}33\%;$$

$$\%C_2H_4 = \frac{C_2H_4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2} =$$

$$= \frac{0,0001}{0,0021 + 0,0001 + 0,00005} = 4,44\%;$$

$$\%C_2H_2 = \frac{C_2H_2}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2} =$$

$$= \frac{0,00005}{0,0021 + 0,0001 + 0,00005} = 2,22\%;$$

2) для АТ-2 «Ж» (отбор пробы масла от 06.10.2021)

$\%CH_4 = 35,84\%$; $\%C_2H_4 = 63,01\%$; $\%C_2H_2 = 1,15\%$;

3) для Т-91 (отбор пробы масла от 05.04.2022)

$\%CH_4 = 25,51\%$; $\%C_2H_4 = 51,02\%$; $\%C_2H_2 = 23,47\%$.

По найденным процентным содержаниям газов были нанесены точки на треугольник Дюваля (рис. 3).

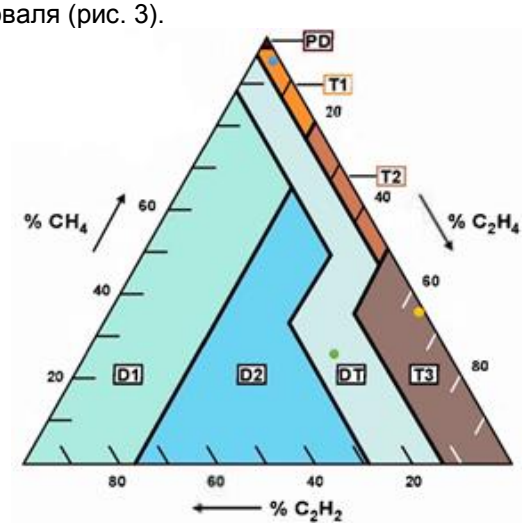



Рис. 3. Расчет с помощью метода треугольника Дюваля: PD – частичный разряд; T1 – тепловое повреждение $t \le 300$ °C; T2 – тепловое повреждение 300 °C < $t \le 700$ °C; T3 – тепловое повреждение $t > 700$ °C; D1 – электрические разряды малой мощности; D2 – электрические разряды большой мощности; DT – сочетание тепловых повреждений и разрядов

Точка (Т-98А) в зоне T1 показывает, что в трансформаторе имеется тепловое повреждение ($t \le 300$°C). Начиная со значений, полученных от 09.02.2022, точка попадает в зону PD, что означает, что в трансформаторе происходят частичные разряды.

Точка (АТ-2 «Ж») в зоне T3 соответствует тепловому повреждению (>700 °C) (аналогичный результат получается при расчете для всех отборов проб масла).

Точка (Т-91) в зоне DT обозначает сочетание тепловых повреждений и разрядов (аналогичный результат получается при расчете для всех отборов проб масла).

Для определения вида повреждения по *методике ETRA* [5] необходимо рассчитать всего 2 отношения:

1) для Т-98А (отбор пробы масла от 06.10.2021)

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_6} = 0,25; \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6} = 0,5;$$

2) для АТ-2 «Ж» (отбор пробы масла от 06.10.2021)

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_6} = 0,18; \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6} = 9,996;$$

3) для Т-91 (отбор пробы масла от 05.04.2022)

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_6} = 9,2; \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6} = 20.$$

Полученные данные отражены на рис. 4.

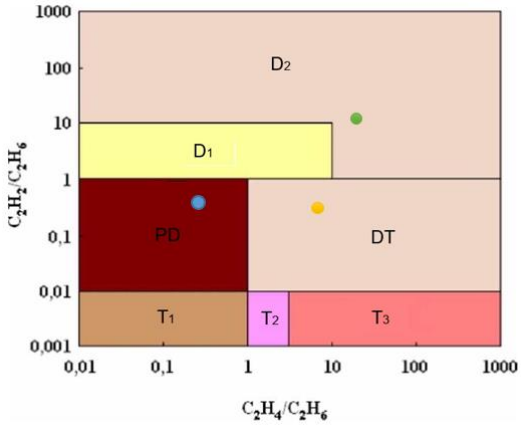



Рис. 4. Расчет по методике ETRA

Точка (Т-98А) в зоне PD показывает, что в ТР происходят частичные разряды (аналогичный результат получается при расчете для всех отборов проб масла).

Точка (АТ-2 «Ж») в зоне DT соответствует сочетанию тепловых повреждений и разрядов (аналогичный результат получается при расчете для всех отборов проб масла).

Точка (Т-91) в зоне D1 соответствует электрическим разрядам малой мощности (аналогичный результат получается при расчете для всех отборов проб масла).

*Методика РД 153-34.0-46.302-00* [6], принятая в РФ, сходна с методикой Роджерса, но для уточнения результатов используется дополнительное соотношение $\frac{CO_2}{CO}$:

1) для Т-98А (отбор пробы масла от 06.10.2021)

$$\frac{CO_2}{CO} = 14,44;$$

2) для АТ-2 «Ж» (отбор пробы масла от 06.10.2021)

$$\frac{CO_2}{CO} = 6;$$

3) для Т-91 (отбор пробы масла от 05.04.2022)

$$\frac{CO_2}{CO} = 4,35.$$

Анализ полученных данных, а также данных из [6, табл. 3] позволяет сделать вывод, что в трансформаторе Т-98А происходят частичные разряды с высокой плотностью энергии, а также повреждена твердая изоляция (как и в методике Роджерса, начиная с 05.01.2022 определить вид дефекта с помощью данной методики не представляется возможным); в автотрансформаторе АТ-2 «Ж» – термический дефект высокой температуры (> 700 °С), а также начиная с отбора пробы масла от 26.01.2022 выявлено повреждение твердой изоляции; в трансформаторе Т-91 происходят разряды большой мощности и повреждена твердая изоляция.

**Результаты исследования.** Сведем все полученные дефекты в таблицу (табл. 8).

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. В трансформаторе Т-98А выявлено наличие частичных разрядов, но относительная скорость роста газовыделения $H_2$ – менее 10 %.

Сам по себе водород при низких концентрациях остальных газов, растворённых в трансформаторном масле, не является признаком дефекта трансформатора. Наиболее вероятной причиной увеличения содержания водорода в масле могут быть недостатки технологической обработки трансформаторного масла при монтаже трансформатора. Также нельзя исключать технологическую особенность масла ГК, имеющую химические причины последующего выделения водорода.

Опыт устранения аналогичных проблем с газообразованием в масле показывает эффективность метода так называемой «глубокой» дегазации, включающей в себя прогрев до высоких температур активной части трансформатора циркуляцией масла через подогреватели, слив масла из бака, длительное вакуумирование и последующую вакуумную заливку масла с дегазацией. Таким образом убираются газовые включения из изоляции активной части, возможное поверхностное увлажнение и воздушные пузыри в застойных местах.

Качественно выполненная «глубокая» дегазация в большинстве случаев снимает проблему газовыделения, однако в начальный период эксплуатации возможен незначительный рост концентраций горючих газов относительно «нулевых» значений после выполненных работ, так как полностью убрать газовые включения из пор твердой изоляции в полевых условиях иногда не удается.

2. В ТР АТ-2 «Ж» выявлен высокотемпературный термический дефект.

Зафиксированные первоначально высокие концентрации газов можно интерпретировать следующим образом: поскольку до проведения дегазации концентрации газов были очень высоки, то после обработки масла какое-то время может наблюдаться рост горючих газов. Этот процесс обусловлен быстрым выходом остаточных газов из пор изоляции в масло в результате нагрева активной части. При отсутствии внутреннего дефекта рост газов в дальнейшем должен остановиться, концентрации газов стабилизироваться.

За период отбора проб масла с 26.01.2022 по 20.04.2022 концентрация газов практически не менялась. Рост газов прекратился (концентрация газов стабилизировалась), что может свидетельствовать об отсутствии источника газообразования внутри бака. Небольшое колебание концентраций газов в большую или меньшую сторону может быть связано с температурой окружающей среды, режимом работы АТ и погрешностью измерений при выполнении анализа пробы масла.

Таблица 8. **Неисправности силовых ТР, выявленные с использованием различных методик**

| Методика | Неисправность ТР | | |
|---|---|---|---|
| | Т-98А | АТ-2 «Ж» | Т-91 |
| Методика Роджерса | Частичные разряды/ определить невозможно | Термический дефект высокой температуры (>700 °С) | Электрические разряды большой мощности |
| МЭК 60599 | Определить невозможно | Термический дефект высокой температуры (>700 °С) | Определить невозможно |
| Методика Дорненбурга | Частичные разряды/ определить невозможно | Термический дефект | Определить невозможно |
| Треугольник Дюваля | Тепловое повреждение ($t \leq 300$°С)/ частичные разряды | Термический дефект высокой температуры (>700 °С) | Сочетание тепловых повреждений и разрядов |
| Методика ETRA | Частичные разряды | Сочетание тепловых повреждений и разрядов | Электрические разряды малой мощности |
| Методика по РД 153-34.0-46.302-00 | Частичные разряды с высокой плотностью энергии и повреждение твердой изоляции/ определить невозможно | Термический дефект высокой температуры (>700 °С). Повреждение твердой изоляции | Разряды большой мощности и повреждение твердой изоляции |

Концентрация этилена превышала граничные значения, но при этом отсутствовала динамика роста данного газа. Это связано с тем фактом, что изначально перед дегазацией концентрация этилена была наибольшей относительно других газов и изоляция активной части была перенасыщена этиленом.

В настоящее время выход остаточных газов из изоляции в масло в результате нагрева активной части практически прекратился, что является нормальным процессом и не является признаком развивающегося дефекта.

3. Т-91 по имеющимся данным концентраций газовых включений в отборах проб масла определить дефект затруднительно.

**Алгоритм применения методик интерпретации результатов ГХА и формирования обучающих выборок.**

На рис. 5 представлен алгоритм комплексного применения описанных выше методик интерпретации результатов ГХА и формирования обучающих выборок.

Разработанный алгоритм содержит три функциональных блока. Блок I предназначен для формирования диагностической статистики в процессе эксплуатации рассматриваемого трансформаторного оборудования. Блоки II и III служат соответственно для выполнения расчетов в целях анализа результатов ГХА с помощью вышеперечисленных методик, непосредственной идентификации параметров текущего и прогнозного состояний ТР и формирования предложений по мероприятиям для нивелирования рисков отказа оборудования.

Эффективность предлагаемого алгоритма заключается в возможности создания системы предупреждения отказов силового трансформатора, обеспечивающей повышение надежности контроля технического состояния силового маслонаполненного трансформатора за счет раннего выявления в нем зарождающихся неисправностей благодаря непрерывному контролю концентрации растворенных в масле газов.

**Выводы.** В ходе проведенного исследования выявлены следующие недостатки ГХА:

– довольно часто встречаются ситуации, которые тяжело идентифицировать даже эксперту. Следовательно, рекомендуется формировать обучающие выборки по оценке состояния силовых трансформаторов на основе прецедентной информации;

– в связи с отсутствием универсальности методов необходимо, основываясь на РД 153-34.0-46.302-00, принятом в РФ, учитывать совокупность всех доступных методик.

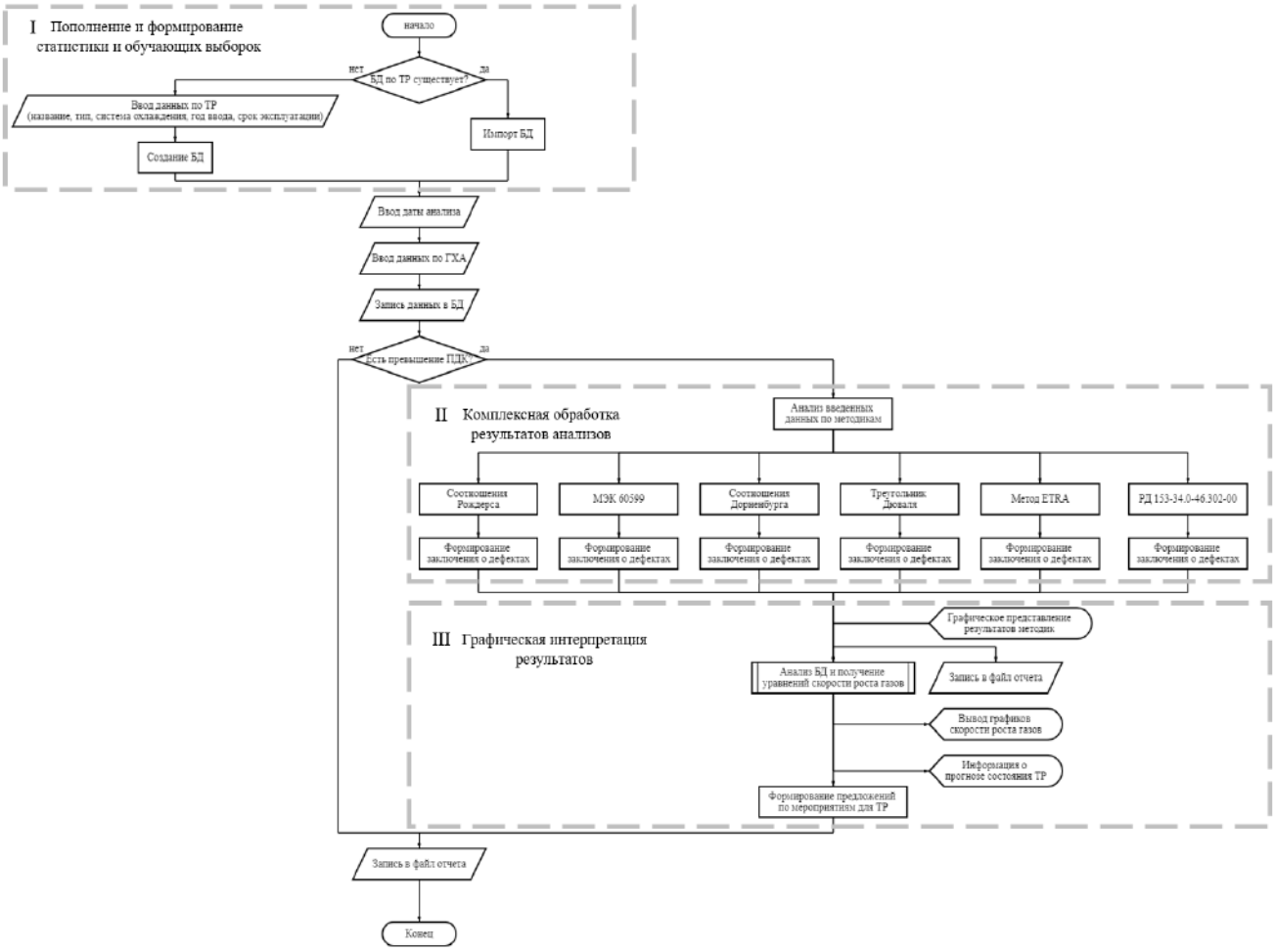



Рис. 5. Алгоритм комплексного применения методик интерпретации результатов ГХА и формирования обучающих выборок

Анализ полученных результатов (табл. 8) показывает, что каждая методология интерпретации результатов ГХА формирует только схожие заключения по характеру дефекта в ТР, соответственно, окончательное решение должно учитывать совокупность всех доступных методик. Важно также учесть тот факт, что иногда дефект, который не был обнаружен с использованием одной из методик, возможно обнаружить посредством другой методики.

Выделить наилучшую методику из рассмотренных затруднительно в связи с отсутствием прямой зависимости между концентрациями выделяющихся газов и видом/характером дефекта. К тому же на выделение газов влияет множество дополнительных сторонних факторов (например, состав трансформаторного масла, условия эксплуатации оборудования, срок службы и др. [15]). Однако в [15] отмечено, что наибольшую диагностическую ценность имеет методика МЭК (IEC 60599), которая рекомендована к применению в РД 153-34.0-46.302-00, в связи с чем одним из дальнейших направлений исследований планируется после получения результатов ХАРГ организовать вскрытие силового трансформатора.

В рамках продолжения исследования планируется создание программного обеспечения на основе сформированного алгоритма. Разработанное ПО по оценке технического состояния силовых трансформаторов обеспечит получение более надежного результата:

– за счет учета совокупности всех основных используемых методик интерпретации результатов хроматографических анализов растворенных газов в масле;

– учета конструктивных особенностей силовых трансформаторов и срока их эксплуатации;

– использования абсолютных значений скоростей роста концентраций газов вместо относительных значений в качестве критерия оценки скорости развития дефекта в ТР;

– формирования рекомендаций по проведению необходимых мероприятий для устранения выявленных дефектов.

### Список литературы


1. **Святых А.Б.** Развитие акустических способов контроля технического состояния жидкой изоляции маслонаполненных трансформаторов // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – № 1(26). – С. 22–25.
2. **Елтышев Д.К.** Интеллектуальные модели комплексной оценки технического состояния высоковольтных выключателей // Информационно-управляющие системы. – 2016. – № 5(84). – С. 45–53.
3. **Романов А.С.** Анализ и классификация известных методов и средств диагностики силовых масляных трансформаторов // Молодой ученый. – 2020. – № 22(312). – С. 138–142.
4. **Алексеев Б.А.** Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов (Основное электрооборудование в энергосистемах: обзор отечественного и зарубежного опыта). – М.: Изд-во НЦЭНАС, 2002. – 216 с.
5. **Хроматографический** анализ растворенных газов в диагностике трансформаторов / Л.В. Виноградова, Е.Б. Игнатьев, Ю.М. Овсянников, Г.В. Попов. – Иваново, 2013. – 104 с. – EDN MNDUQS.
6. **Методические** указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле РД 153-34.0-46.302-00 / разработан Департаментом научно-технической политики и развития РАО «ЕЭС России», Научно-исследовательским институтом электроэнергетики (АО ВНИИЭ), ЗАО Московский завод «Изолятор» им. А. Баркова: утв.: РАО ЕЭС России 12 дек. 2000 г. // РАО «ЕЭС России». – М., 2001. – 41 с.
7. **Вильданов Р.Г., Кутырев Д.Н., Вахитова А.Р.** Экспериментальные исследования взаимосвязи технического состояния силового масляного трансформатора с параметрами, полученными при хроматографическом анализе состава газов в масле // Успехи современной науки. – 2017. – Т. 5, № 4. – С. 79–83. – EDN YROQOT.
8. **Толянов А.** Исследования неисправностей силовых трансформаторов на основе анализа растворенных в масле газов [Электронный ресурс] // ИТЦ «Авикон». – URL: https://itc-avikon.ru/materials/issledovaniya-neispravnostej-silovyh-transformatorov-na-osnove-analiza-rastvorennyh-v-masle-gazov/ (дата обращения: 20.07.2022).
9. **Алексеев Б.А.** Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 216 с.
10. **Rogers R.R.** IEEE Transactions on Electrical Insulation. – 1978. – Vol. 13. – P. 349.
11. **Mineral** oil-impregnated electrical equipment in service–guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis. IEC Standard 60599. 2007.
12. **Dornenburg E, Strittmatter W.** Brown Boveri Review. – 1974. – Vol. 61. – P. 238.
13. **Duval M.** IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2002. – Vol. 18. – P. 8.
14. **Duval M., Dukarm J.** IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2005. – Vol. 21. – P. 21.
15. **Алексеев В.Г., Несвижский Е.И.** Выбор оптимальных значений критериев при диагностике состояния силовых трансформаторов по результатам анализа растворенных в масле газов // Электрические станции. – 1991. – № 1. – С. 64.


### References


1. Svyatykh, A.B. Razvitie akusticheskikh sposobov kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya zhidkoy izolyatsii maslonapolnennykh transformatorov [Development of acoustic methods for monitoring the oil-filled transformer liquid insulation integrity]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy*, 2015, vol. 1(26), pp. 22–25.
2. Eltyshev, D.K. Intellektual'nye modeli kompleksnoy otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovol'tnykh vyklyuchateley [Intelligent models for comprehensive assessment of the high-voltage circuit breaker integrity]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy,* 2016, no. 5(84), pp. 45–53.
3. Romanov, A.S. Analiz i klassifikatsiya izvestnykh metodov i sredstv diagnostiki silovykh maslyanykh transformatorov [Analysis and classification of known methods and diagnostic tools for power oil

transformers]. *Molodoy uchenyy*, 2020, no. 22(312), pp. 138–142.

4. Alekseev, B.A. *Kontrol' sostoyaniya (diagnostika) krupnykh silovykh transformatorov (Osnovnoe elektrooborudovanie v energosistemakh: obzor otechestvennogo i zarubezhnogo opyta)* [Large power transformer integrity monitoring (Basic Electrical Equipment in Power Systems: Overview of Domestic and Foreign Experience)]. Moscow: Izdatel'stvo NTsENAS, 2002. 216 p.

5. Vinogradova, L.V., Ignat'ev, E.B., Ovsyannikov, Yu.M., Popov, G.V. *Khromatograficheskiy analiz rastvorennykh gazov v diagnostike transformatorov* [Chromatographic analysis of dissolved gases in transformer diagnostics]. Ivanovo, 2013. 104 p. EDN MNDUQS.

6. Metodicheskie ukazaniya po diagnostike razvivayushchikhsya defektov transformatornogo oborudovaniya po rezul'tatam khromatograficheskogo analiza gazov, rastvorennykh v masle RD 153-34.0-46.302-00 [Guidelines for diagnostics of developing faults in transformer equipment based on the results of the Dissolved Gas-in-Oil Chromatographic Analysis RD 153-34.0-46.302-00]. *RAO EES Rossii 12 dek. 2000 g.* Moscow, 2001. 41 p.

7. Vil'danov, R.G., Kutyrev, D.N., Vakhitova, A.R. Eksperimental'nye issledovaniya vzaimosvyazi tekhnicheskogo sostoyaniya silovogo maslyanogo transformatora s parametrami, poluchennymi pri khromatograficheskom analize sostava gazov v masle [Experimental studies of the relationship between the power oil transformer integrity and parameters obtained by the Dissolved Gas-in-Oil Chromatographic Analysis]. *Uspekhi sovremennoy nauki,* 2017, vol. 5, pp. 79–83. EDN YROQOT.

8. Tolyanov, A. Issledovaniya neispravnostey silovykh transformatorov na osnove analiza rastvorennykh v masle gazov [Studies of power transformer faults based on the analysis of gases dissolved in oil]. *ITTs "Avikon".* Available at: https://itc-avikon.ru/materials/issledovaniya-neispravnostej-silovyh-transformatorov-na-osnove-analiza-rastvorennyh-v-masle-gazov/ (access date: 20.07.2022).

9. Alekseev, B.A. *Kontrol' sostoyaniya (diagnostika) krupnykh silovykh transformatorov* [Large power transformer integrity monitoring]. Moscow: Izdatel'stvo NTs ENAS, 2002. 216 p.

10. Rogers, R.R. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1978, vol. 13, p. 349.

11. Mineral oil-impregnated electrical equipment in service–guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis. IEC Standard 60599, 2007.

12. Dornenburg, E., Strittmatter, W. Brown Boveri Review, 1974, vol. 61, p. 238.

13. Duval, M. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, vol. 18, p. 8.

14. Duval, M., Dukarm, J. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, vol. 21, p. 21.

15. Alekseev, V.G., Nesvizhskiy, E.I. Vybor optimal'nykh znacheniy kriteriev pri diagnostike sostoyaniya silovykh transformatorov po rezul'tatam analiza rastvorennykh v masle gazov [Selection of optimal values of criteria for the diagnosis of the state of power transformers based on the results of the analysis of gases dissolved in oi]. *Elektricheskie stantsii*, 1991, no. 1, p. 64.

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.321

**Андрей Ильич Тихонов**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой физики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-28, e-mail: aitispu@mail.ru

**Андрей Александрович Каржевин**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-05, e-mail: drusja95@gmail.com

**Алексей Вадимович Стулов**
ООО «НПК «АВТОПРИБОР», кандидат технических наук, зам. ген. директора по научной работе, Россия, Владимир, e-mail: alxstl@mail.ru

**Денис Михайлович Тихомиров**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-28, e-mail: zenitd12@live.com

**Владислав Евгеньевич Розин**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-28, e-mail: kalmar20006@mail.ru

## Технология построения имитационных моделей силовых трансформаторов с произвольной конструкцией активной части[1]

**Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Существующие имитационные модели силовых трансформаторов, функционирующие, например, в среде MATLAM Simulink SimPowerSystem, строятся на основе модели идеального трансформатора, что позволяет использовать данную модель в качестве автономного звена сложной электрической цепи. Главный недостаток таких моделей состоит в сложности учета при моделировании нетиповых исполнений магнитопровода и специальных схем соединения элементов обмотки. Особенно значительные проблемы возникают при моделировании специальных трансформаторов некоторых классов. В то же время традиционно при моделировании переходных режимов трансформаторов используется другой подход, основанный на использовании матриц индуктивностей, позволяющих учесть все особенности конструкции активной части трансформатора. К недостаткам данного подхода можно отнести необходимость описания в данной модели, помимо трансформатора, также и внешней электрической цепи. Поэтому актуальной является проблема разработки новой технологии построения имитационных моделей трансформаторов с произвольной конструкцией активной части, в которых выполняется требование автономности модели трансформатора от модели внешней цепи.
**Материалы и методы.** Использованы методы моделирования электрических и магнитных цепей, построенных на основе теории обыкновенных дифференциальных уравнений, а также метод имитационного моделирования с использованием пакета MatLab Simulink SimPowerSystems.

[1] Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ, региональный конкурс Ивановской области, проект № 20-48-370001 от 19.01.2021.
The project is carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, regional competition of the Ivanovo region, project No. 20-48-370001 dated 01/19/2021.

© Тихонов А.И., Каржевин А.А., Стулов А.В., Тихомиров Д.М., Розин В.Е., 2023
Вестник ИГЭУ, 2023, вып. 4, с. 28–35.

**Результаты.** Разработана технология построения имитационных моделей трансформаторов с произвольной конструкцией активной части, основанная на использовании типовых подсистем. Приведен алгоритм построения матрицы индуктивностей по основному магнитному полю трансформатора при имеющейся схеме замещения магнитной цепи. Приведена схема модели трехфазного трансформатора, построенная с использованием предлагаемой технологии, а также результаты сравнения кривых токов в первичных и вторичных обмотках трансформатора при включении его на холостой ход и активную нагрузку, полученные на существующей и новой моделях.
**Выводы.** Результаты работы могут быть использованы при проектировании общепромышленных и специальных трансформаторов в проектных организациях и в условиях производства. Особый эффект разработанная технология может дать при использовании ее на стадии НИОКР при исследовании режимов работы трансформаторов, в отношении которых на данном конкретном предприятии отсутствует опыт их проектирования и изготовления.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование трансформаторов, теория цепей, магнитные цепи, моделирование с использованием MatLab Simulink SimPowerSystems

**Andrey Ilyich Tikhonov**
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Physics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-28, e-mail: aitispu@mail.ru

**Andrey Alexandrovich Karzhevin**
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-05, e-mail: drusja95@gmail.com

**Alexey Vadimovich Stulov**
LLC “NPK AVTOPRIBOR”, Candidate of Engineering Sciences, Vice Director for Research, Russia, Vladimir, e-mail: alxstl@mail.ru

**Denis Mikhailovich Tikhomirov**
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-28, e-mail: zenitd12@live.com

**Vladislav Evgenievich Rozin**
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-28, e-mail: kalmar20006@mail.ru

# Technology for simulation models of power transformers with arbitrary design of active part

**Abstract**

**Background.** Existing simulation models of power transformers that operate, for example, in the MATLAM Simulink SimPowerSystem environment, are based on an ideal transformer model. It allows using this model as an autonomous link in a complex electrical circuit. The main disadvantage of such models is the difficulty to consider non-standard versions of the magnetic circuit and special schemes for connecting winding elements when modeling. Particularly significant problems arise when modeling special transformers of the certain classes. At the same time, traditionally, when modeling the transient modes of transformers, a different approach is used. It is based on the use of inductance matrices which allows considering all the design features of the active part of the transformer. The disadvantage of this approach is the need to describe an external electrical circuit in addition to the transformer. Therefore, the problem to develop a modern technology for simulation models of transformers with an arbitrary design of the active part is topical. This model meets the requirement for the autonomy of the transformer model from the external circuit model.
**Materials and methods.** The authors have used the methods of modeling electrical and magnetic circuits based on the theory of ordinary differential equations, and simulation method using the MatLab Simulink SimPowerSystems package.
**Results.** A technology has been developed for simulation models of transformers with an arbitrary design of the active part based on the use of typical subsystems. An algorithm for matrix of inductances based on the main magnetic field of the transformer with the existing equivalent circuit of the magnetic circuit is given. The authors have presented a diagram of a three-phase transformer model developed using the proposed technology, as well as the results of comparing the current curves in the primary and secondary windings of the transformer when it is turned on at idle and with a resistive load. The results are obtained using the existing and new models.
**Conclusions.** The results of the study can be used to design general industrial and special transformers in design companies and in manufacturing environment. The developed technology can give a special effect when it is used at the R&D stage to study the operating modes of transformers in case the enterprise has no experience to design and manufacture them.

**Key words:** transformer simulation, circuit theory, magnetic circuits, simulation using MatLab Simulink SimPowerSystems

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.4.028-035

**Введение.** Согласно ГОСТ Р 57188-2016[2], под имитационной моделью понимается «частный случай математической модели процесса, явления, который представляет процесс с определенной точностью». Согласно ГОСТ Р 57412-2017[3], «имитационная модель отражает элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить свойства объекта моделирования».

Имитационные модели технических устройств позволяют исследовать произвольные режим работы данных устройств (установившиеся, переходные, нормальные, аварийные и т.п.) как на стадии эксплуатации данных устройств, так и на стадии их проектирования. Особый интерес представляют модели, используемые на стадии НИОКР, так как в данном случае моделирование позволяет избавиться от трудоемких и затратных работ, связанных с созданием и исследованием опытных образцов продукции.

Однако не каждая модель может быть использована в предпроектных исследованиях. Большинство моделей однозначно привязаны к особенностям конструкции конкретного класса устройств. В то же время НИОКР подразумевает возможный выход на решения, для которых используемая модель непригодна.

Например, имитационные модели силовых трансформаторов, используемые в популярном пакете MATLAB Simulink SimPowerSystems [1], ориентированы в первую очередь на задачи имитации работы силовых трансформаторов типовой конструкции. При необходимости выхода за пределы типовых исполнений предлагаемые модели неприменимы. Например, эти модели не могут быть использованы при проектировании и исследовании работы преобразовательных трансформаторов со сложной схемой соединения элементов обмотки [2] или в случае нетиповой конструкции магнитопровода.

Следует отметить также, что совершенно выпадают из области имитационного моделирования и трансформаторы (а также реакторы и дроссели), в которых обмотка выполнена из ленты или шин. Особенно это важно при наличии значительных магнитных потоков за пределами магнитопровода, приводящих к сложной картине вытеснения тока в массивных проводниках, существенно искажающих динамику протекающих процессов.

Нельзя также не отметить тот факт, что обычно имитационные модели трансформаторов отражают лишь протекание электромагнитных процессов. В то же время процессы теплопереноса в трансформаторе, особенно в динамике, в имитационных моделях практически не представлены.

Таким образом, актуальной является задача разработки новой технологии имитационного моделирования, позволяющей строить и исследовать имитационные модели трансформаторов произвольной конструкции.

**Методы исследования.** Способы построения электрических схем замещения многообмоточных трансформаторов с произвольной конфигурацией магнитной системы и схемы соединений элементов обмотки подробно описаны в [3, 4]. Главная проблема состоит в том, что приведенный в [3, 4] математический аппарат не адаптирован к современным компьютерным технологиям имитационного моделирования. Например, при реализации данных моделей возникает проблема стыковки модели трансформатора с моделью внешней электрической цепи.

Данная проблема, в частности, решена в MATLAB Simulink SimPowerSystems [5] за счет использования модели идеального трансформатора, позволившего разделить первичную и вторичную цепи без использования матрицы индуктивностей. Этот же подход был использован при создании модели силового трансформатора в [6]. Дополнение полученной модели средствами учета взаимного влияния обмоток по полям за пределами магнитопровода [7] позволил получить повышенную точность моделирования трансформатора в переходных и особенно в несимметричных режимах работы.

Однако анализ и практика использования данного подхода показали, что он не позволяет учесть особенности характера изменения намагничивающего тока в некоторых специальных трансформаторах. Речь идет в первую очередь о трансформаторах, в которых на одном стержне располагаются по несколько обмоток разных фаз. Это характерно, например, для трансформатора Скотта, однофазного трансформатора с двумя первичными обмотками на одном стержне, которые иногда используются на мощных электростанциях, и др. Аналогичные проблемы возникают и при моделировании переходных режимах в трансформаторе, в котором первичная обмотка соединена в зигзаг. Кроме того, данный подход сложно адаптировать к учету некоторых особенностей конструкции магнитопровода (пространствен-

[2] ГОСТ Р 57188-2016. Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. Введ. 2017-05-01. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2016.

[3] ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения. Введ. 2017-07-01. – М.: Стандартинформ, 2017.

ная конструкция, бронестержневая конструкция трехфазного трансформатора и др.).

Для решения подобных проблем была разработана технология построения имитационных моделей трансформаторов, обладающая определенной степенью универсальности с точки зрения учета конструкции магнитопровода и схемы соединения элементов обмотки.

Особенность данной технологии состоит в том, что модель трансформатора произвольной конструкции строится из определенного набора типовых модулей. При этом, в отличие от подхода, описанного в [5–7], используется матрица индуктивности по основному полю внутри магнитопровода, что соответствует классическим представлениям о методах решения системы обыкновенных уравнений, так как опирается на классическую форму ее записи:

$$\frac{d}{dt}\{i\} = \left([L]+[L_s]\right)^{-1}\{e\}, \quad (1)$$

где {i}, {e} – векторы токов и ЭДС в обмотках трансформатора соответственно; [L], [$L_s$] – матрицы индуктивностей по полям внутри и за пределами магнитопровода соответственно.

Матрица [$L_s$] является линейной, и ее элементы могут быть вычислены на этапе построения модели. Элементы нелинейной матрицы [L] пересчитываются на каждом шаге интегрирования по времени системы обыкновенных дифференциальных уравнений, к которой сводится имитационная модель трансформатора и внешней цепи. Диагональные элементы матрицы [L] рассчитываются по формуле

$$L_{pp} = \Lambda_{pp} w_p^2, \quad (2)$$

где $\Lambda_{pp}$ – магнитная проводимость магнитопровода по отношению к стержню, на котором располагается *p*-я обмотка; $w_p$ – число витков в *p*-й обмотке.

Величина $\Lambda_{pp}$ является нелинейной, т. е. именно она пересчитывается на каждом шаге интегрирования в зависимости от текущих значений магнитной индукции в элементах магнитопровода трансформатора. Формула для расчета $\Lambda_{pp}$ зависит от конструкции магнитопровода. Например, в случае магнитопровода стержневой конструкции с косыми стыками, схема замещения магнитной цепи которого представлена на рис. 1, получаем:

$$\Lambda_{pp} = \frac{1}{R_{mpp}} = \frac{1}{R_{mp} + \dfrac{1}{\Lambda_q + \Lambda_r + \Lambda_0}}; \quad (3)$$

$$R_{mp,q,r} = \frac{\ell_{p,q,r}}{\mu_0 \mu_{p,q,r} S_{p,q,r}} + \frac{\delta_{p,q,r}}{\mu_0 \sqrt{2} S_{p,q,r}}; \quad (4)$$

$$\Lambda_{0,p,q,r} = \frac{1}{R_{m0,p,q,r}}; \quad (5)$$

$$q = \begin{cases} p+1, \text{ при } p<3, \\ 1, \text{ при } p=3; \end{cases} \quad r = \begin{cases} q+1, \text{ при } q<3, \\ 1, \text{ при } q=3, \end{cases} \quad (6)$$

где $R_{mpp}$ – магнитное сопротивление магнитопровода со стороны стержня, на котором располагается *p*-я обмотка; $R_{mp,q,r}$ – магнитное сопротивление *p*-й, *q*-й или *r*-й магнитной ветви магнитопровода; $R_{m0}$ – магнитное сопротивление нулевой последовательности (определяется по результатам расчета магнитного поля нулевой последовательности); $\ell_{p,q,r}, \mu_{p,q,r}, S_{p,q,r}, R_{mp,q,r}, \delta_{p,q,r}, S_{\delta p,q,r}$ – длина средней силовой линии, дифференциальная относительная магнитная проницаемость, активное сечение, магнитное сопротивление и расчетный технологический зазор *p*-й, *q*-й или *r*-й магнитной ветви магнитопровода соответственно.

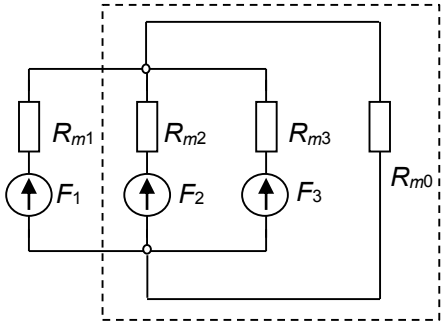



Рис. 1. Схема замещения магнитной системы стержневого магнитопровода

Недиагональные элементы матрицы [L] рассчитываются по формуле

$$L_{pq} = \Lambda_{pq} w_p w_q, \quad (7)$$

где $\Lambda_{pq}$ – взаимная магнитная проводимость магнитопровода между стержнями, на которых располагаются *p*-я и *q*-я обмотки.

Для расчета величины $\Lambda_{pq}$ для схемы, приведенной на рис. 1, используется формула

$$\Lambda_{pq} = \frac{R_{mp} - R_{mpp}}{R_{mq} R_{mpp}}, \quad (8)$$

которая была выведена из допущения о квазилинейном характере магнитной цепи на текущем шаге итерации, что позволяет использовать принцип суперпозиции. При этом

$$L_{pq} \approx \frac{\Delta\Psi_p}{\Delta I_q} = \frac{\Phi'_p - \Phi_p}{\Delta F_q} w_p w_q = \Lambda_{pq} w_p w_q, \quad (9)$$

то есть

$$\Lambda_{pq} = \frac{\Phi'_p - \Phi_p}{\Delta F_q}. \quad (10)$$

Принимая, что намагничивающие силы во всех обмотках, кроме *q*-й, равны нулю (данное допущение справедливо в квазилинейной задаче), получим:

$$\Phi'_p = \Phi_p\left(F_q + \Delta F_q\right) =$$

$$= -\frac{F_q + \Delta F_q - \dfrac{F_q + \Delta F_q}{R_{mqq}} R_{mq}}{R_{mpp}}; \qquad (11)$$

$$\Phi_p = \Phi_p\left(F_q\right) = -\frac{F_q - \dfrac{F_q}{R_{mqq}} R_{mq}}{R_{mpp}}. \qquad (12)$$

Подставляя (10) и (11) в (9), после упрощения получаем (8).

Формула (8) справедлива для всех случаев, когда магнитопровод можно свести к схеме замещения с двумя узлами. Если это сделать не удается, то следует воспользоваться формулой (10), определяя $\Phi'_p$ и $\Phi_p$ по формулам, соответствующим принятой схеме магнитопровода, например, по методике, изложенной в [8] для расчета взаимных проводимостей ветвей линейной электрической цепи.

Для расчета взаимных магнитных проводимостей ветвей магнитной цепи и матрицы индуктивностей трансформатора можно использовать непосредственно средства Simulink, как это показано, например, на рис. 2–4 для модели трансформатора Скотта.

Однако проще использовать для этого блок MATLAB Function, позволяющий вносить в модель MATLAB Simulink фрагменты программного кода на m-языке.

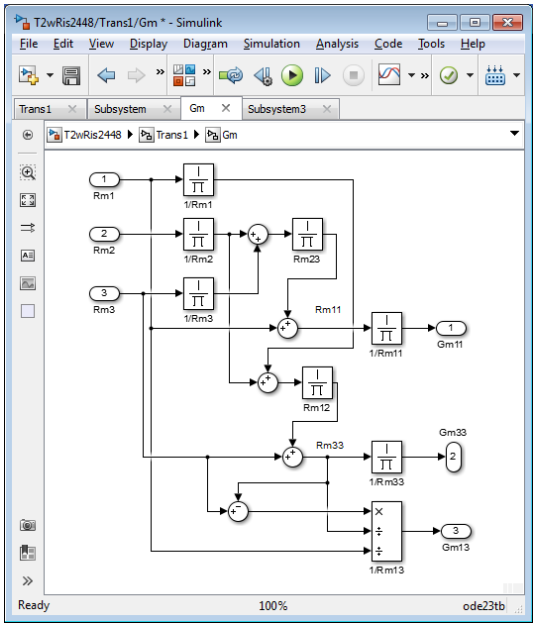



Рис. 2. Модуль расчета магнитных проводимостей магнитной цепи трансформатора Скотта

Для расчета на каждом шаге интегрирования по времени магнитных сопротивлений ветвей магнитной системы, соответствующих стержням, на которых располагаются обмотки трансформатора, используется типовой модуль, структура которого приведена на рис. 5.

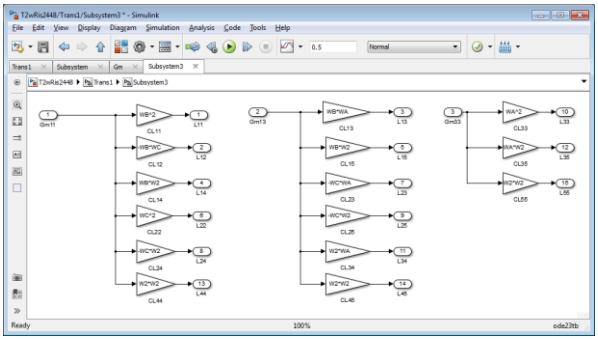


Рис. 3. Модуль расчета элементов матрицы индуктивностей трансформатора Скотта

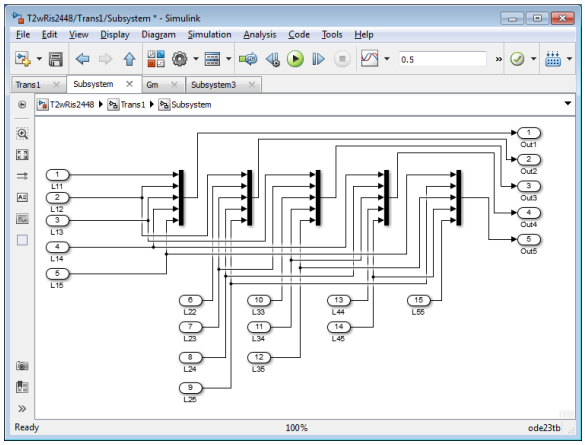



Рис. 4. Модуль формирования матрицы индуктивностей трансформатора Скотта

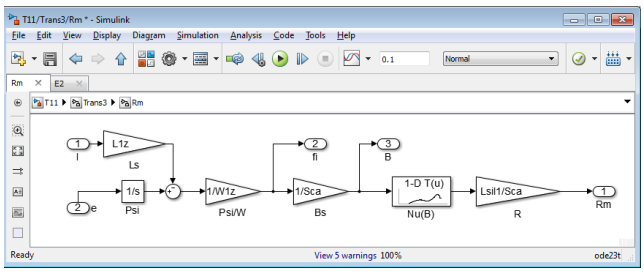



Рис. 5. Типовой модуль расчета магнитного сопротивления магнитной ветви, соответствующей стержню, на котором располагается первичная обмотка

Данный модуль имеет два входа (*I* – ток в обмотке; *e* – ЭДС в обмотке) и три выхода (*fi* – величина магнитного потока ветви; *B* – магнитная индукция в ветви; *Rm* – магнитное сопротивление ветви в данный момент времени). Для вычисления магнитного сопротивления остальных магнитных ветвей используется аналогичный модуль, содержащий только три последних звена, приведенные на рис. 5. На единственный вход такого модуля подается текущее значение магнитного потока ветви.

Для расчета ЭДС *k*-й обмотки используется типовая подсистема, приведенная на рис. 6. Данный блок имеет два электрических контакта u+ и u-, а также математический вход I, на который подается величина тока в обмотке, рассчи-

танная на выходе модели трансформатора на текущем шаге интегрирования.

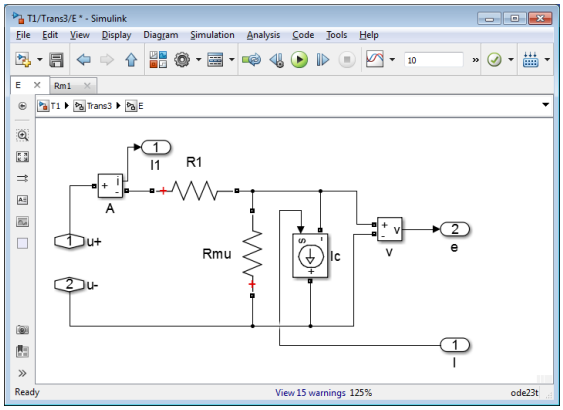



Рис. 6. Подсистема имитации электрической цепи *k*-й обмотки

Данная величина подается на вход управляемого источника тока *Ic*. Напряжение на данном блоке, фиксируемое измерителем напряжения *V*, является ЭДС обмотки. Данная ЭДС подается на выход подсистемы.

С помощью типовых подсистем (рис. 5, 6) и блока MATLAB Function, содержащего алгоритм расчета взаимных магнитных проводимостей ветвей магнитной системы и матрицы индуктивностей, можно построить имитационную модель трансформатора с произвольной конструкцией магнитопровода и произвольной схемой соединения элементов обмоток.

Например, на рис. 7 приведена имитационная модель трехфазного трансформатора с магнитопроводом стержневой конструкции. В левой верхней части модуля приведены описания трех первичных обмоток, ЭДС которых используются для расчета магнитных сопротивлений стержней (точнее магнитных ветвей), на которых они располагаются. Элементы матрицы индуктивностей рассчитываются в блоке MATLAB Function, здесь же рассчитанные элементы группируются в матрицу [L] и складывается с матрицей индуктивности по полям за пределами магнитопровода [$L_s$] (в соответствии с методикой, изложенной в [7]). Затем сформированная матрица инвертируется в блоке [L]^-1 и перемножается с вектором ЭДС обмоток (как первичных, так и вторичных) в блоке di/dt в соответствии с уравнением (1). С выхода данного блока снимается вектор производных по токам, который подается на интегратор 1/s, с выхода которого снимается вектор токов в 6 обмотках трансформатора, элементы которого распределяются по управляющим источникам тока в модулях первичных и вторичных обмоток A, B, C и a, b, c.

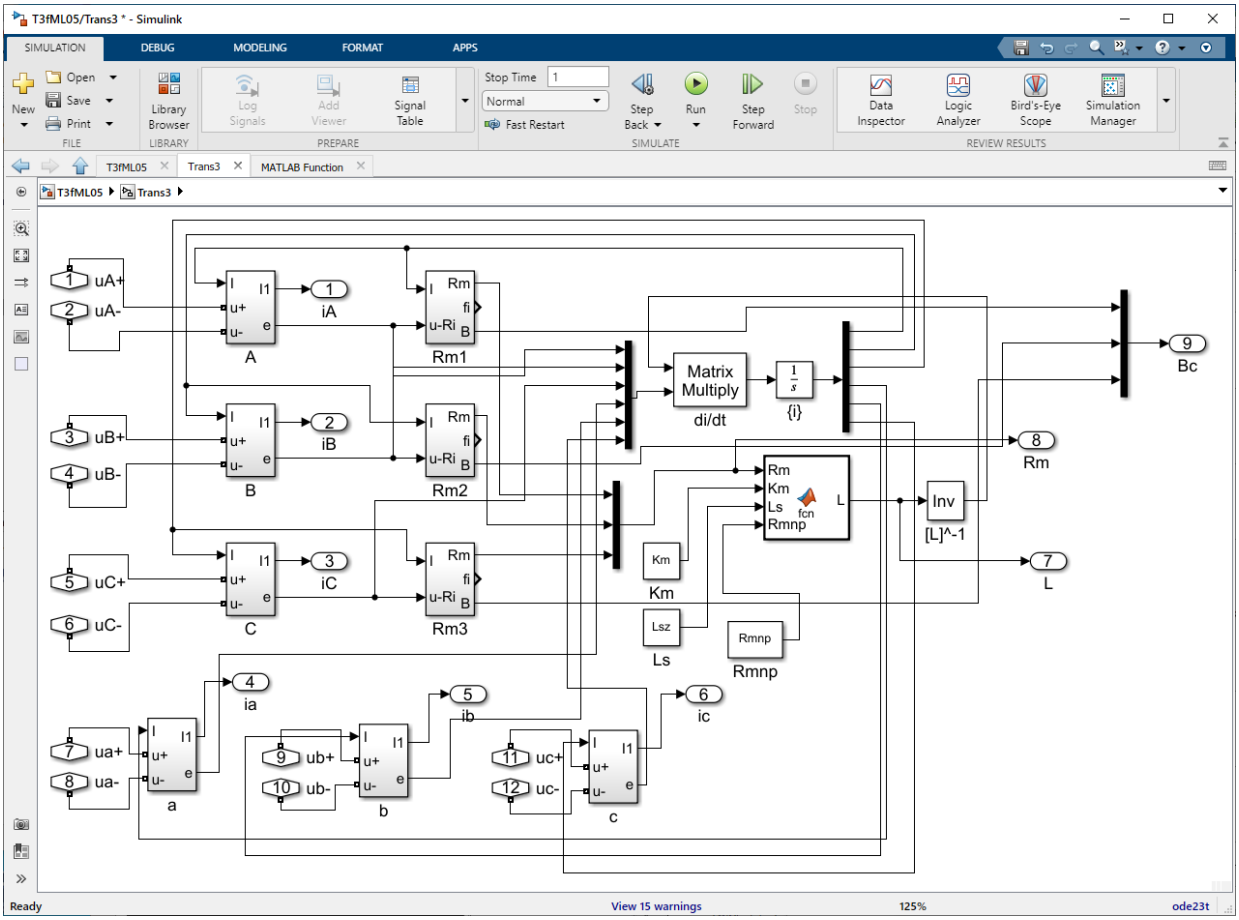



Рис. 7. Имитационная модель трехфазного трансформатора со стержневым магнитопроводом

Полученная модель может быть усложнена дополнительными элементами. Например, в настоящее время ведется работа по созданию детальной тепловой модели трансформатора. В данной модели обмотка делится на фрагменты, каждый из которых описывается электрической схемой замещения тепловых процессов, представленной на рис. 8.

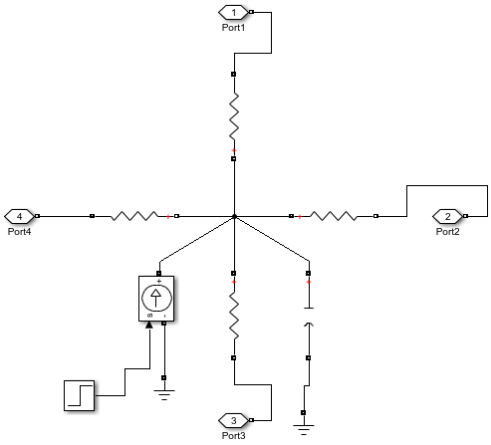



Рис. 8. Фрагмент электрической схемы замещения тепловых процессов в обмотках трансформатора

Аналогичная схема разрабатывается и для моделирования фольговых обмоток с учетом эффекта вытеснения тока к торцам обмотки. Данная модель строится путем фрагментации фольгового проводника на расчетные секции.

**Результаты исследований**. На рис. 9 приведена схема включения в сеть на активную нагрузку двух трансформаторов, один из которых смоделирован по технологии, приведенной в [6], другой – по технологии, описанной выше. На рис. 10 приведены кривые изменения токов в первичных фазных обмотках трансформатора при включении его на ХХ, полученные на двух моделях.

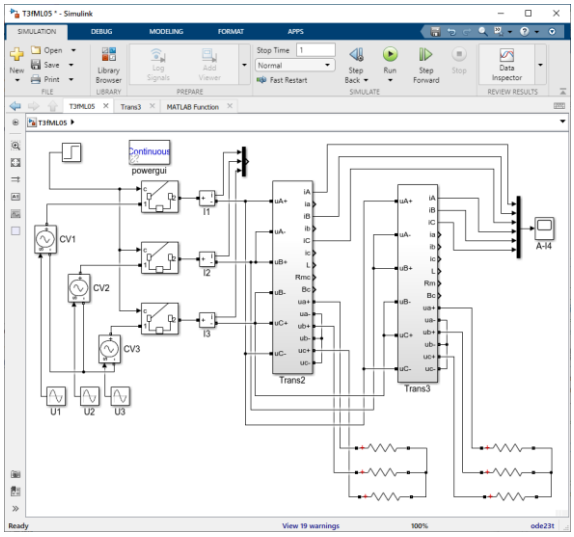
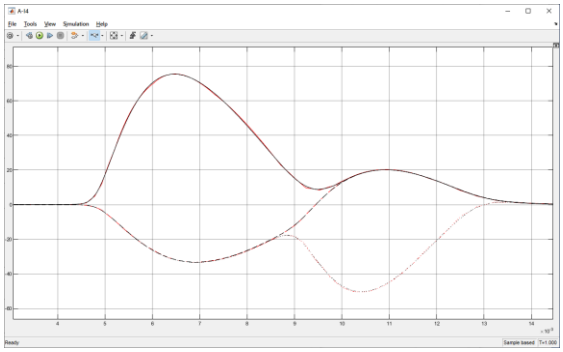
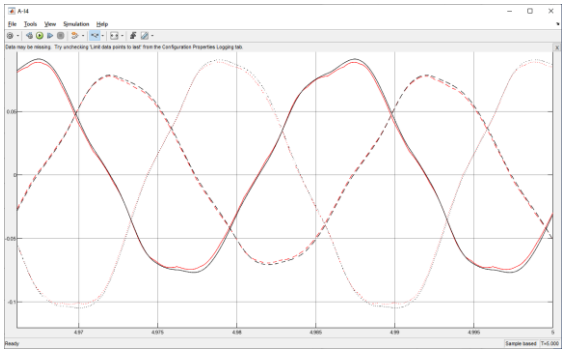



Рис. 9. Схема включения в сеть трехфазного трансформатора, представленного двумя моделями



а)



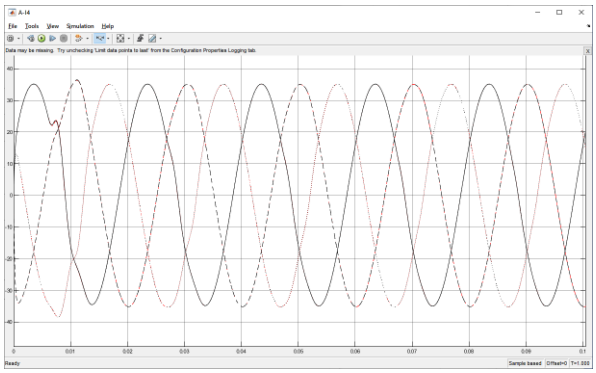
б)

Рис. 10. Кривые токов ХХ при включении трансформатора на ХХ, полученные на двух моделях в разные интервалы времени

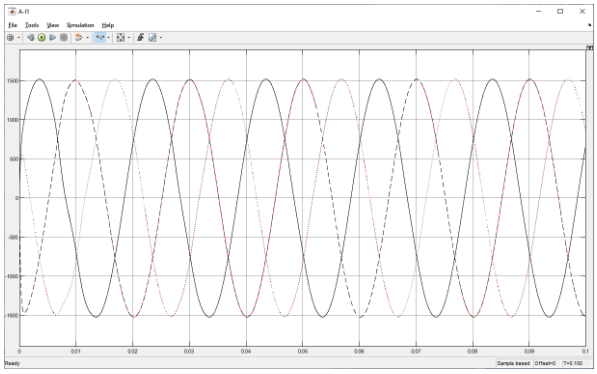
Анализ полученных данных (рис. 9, 10) показывает, что результаты, полученные на двух моделях, практически совпадают. Незначительные искажения вызваны различием в аппроксимации кривых намагничивания стали магнитопровода: в модели, приведенной в [6], используется сплайновая аппроксимация статической магнитной проницаемости, а в модели, рассмотренной выше, – сплайновая аппроксимация дифференциальной магнитной проницаемости. При включении трансформатора на нагрузку различия практически полностью исчезают (рис. 11).

**Выводы.** Рассмотренные элементы технологии построения имитационных моделей силовых трансформаторов могут быть использованы как в случае типовых исполнений трансформаторов, так и в случаях, когда магнитная система имеет нетиповое исполнение. С помощью определенного набора типовых модулей можно построить практически весь набор известных специальных трансформаторов. В частности, в ходе отработки представленной технологии были построены имитационные модели трансформаторов разных типов: однофазных и трехфазных трансформаторов общепромышленного назначения с несколькими вторичными обмотками со стержневыми, бронестержневыми и пространственными магнитопроводами; однофазного трансформатора с двумя первичными обмотками; трансформато-

ров для преобразования с трех фаз на одну и на две (трансформатор Скотта); трансформаторов для промышленных выпрямителей.



а)



б)

Рис. 11. Кривые первичных (а) и вторичных (б) токов при включении трансформатора на нагрузку, полученные на двух моделях

В настоящее время ведется работа по дополнению имитационных моделей элементами моделирования тепловых процессов в трансформаторе на основе разветвленных электрических схем замещения, а также средствами моделирования эффектов вытеснения тока в фольговых обмотках и средствами учета циркуляционных токов в обмотках, намотанных несколькими параллельными проводниками.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании общепромышленных и специальных трансформаторов в проектных организациях и в условиях производства. Особый эффект разработанная технология может дать при использовании ее на стадии НИОКР при исследовании режимов работы трансформаторов, в отношении которых на данном конкретном предприятии отсутствует опыт их проектирования и изготовления.

### Список литературы


1. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
2. **Фишлер Ф.Л., Урманов Р.Н., Пестряева Л.М.** Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 320 с.
3. **Лейтес Л.В.** Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
4. **Лейтес Л.В., Пинцов А.М.** Схемы замещения многообмоточных трансформаторов. – М.: Энергия, 1974. – 192 с.
5. **SimPowerSystems.** For Use with Simulink. User's Guide. The MathWorks [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://matlab4engineers.com/wp-content/uploads/2019/09/powersys.pdf
6. **Тихонов А.И., Стулов А.В., Каржевин А.А., Подобный А.В.** Разработка нелинейной модели трехфазного трансформатора для исследования влияния несимметрии магнитной системы на работу устройства в произвольных режимах // Вестник ИГЭУ. – 2020. – Вып. 1. – С. 22–31.
7. **Снитько И.С., Тихонов А.И., Стулов А.В., Мизонов В.Е.** Разработка модели переходных режимов с учетом взаимной индуктивности полей рассеяния для реализации цифрового двойника трансформатора // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 4. – С. 47–56.
8. **Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В.** Основы теории цепей: учебник для вузов. – 4-е изд. перераб. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.


### References


1. Chernykh, I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press; Saint-Petersburg: Peter, 2008. 288 p.
2. Fishler, F.L., Urmanov, R.N., Pestryaeva, L.M. *Transformatornoe oborudovanie dlya preobrazovatel'nykh ustanovok* [Transformer equipment for converting installations]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 320 p.
3. Leytes, L.V. *Elektromagnitnye raschety transformatorv i reaktorov* [Electromagnetic calculations of transformers and reactors]. Moscow: Energiya, 1981. 392 p.
4. Leytes, L.V., Pintsov, A.M. *Skhemy zameshcheniya mnogoobmotochnykh transformatorov* [Equivalent circuits of multi-winding transformers]. Moscow: Energiya, 1974. 192 p.
5. SimPowerSystems. For Use with Simulink. User's guide. The MathWorks. Available at: https://matlab4engineers.com/wp-content/uploads/2019/09/powersys.pdf.
6. Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Karzhevin, A.A., Podobnyy, A.V. Razrabotka nelineynoy modeli trekhfaznogo transformatora dlya issledovaniya vliyaniya nesimmetrii magnitnoy sistemy na rabotu ustroystva v proizvol'nykh rezhimakh [Development of a nonlinear model of a three-phase transformer to study the influence of the asymmetry of the magnetic system on the operation of the device in arbitrary modes]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 1, pp. 22–31.
7. Snit'ko, I.S., Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Mizonov, V.E. Razrabotka modeli perekhodnykh rezhimov s uchetom vzaimnoy induktivnosti poley rasseyaniya dlya realizatsii tsifrovogo dvoynika transformatora [Development of a model of transient modes, taking into account the mutual inductance of stray fields for the implementation of a digital twin of a transformer]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 4, pp. 47–56.
8. Zeveke, G.V., Ionkin, P.A., Netushil, A.V., Strakhov, S.V. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of the theory of circuits]. Moscow: Energiya, 1975. 752 p.

УДК 621.3+62-5

**Игорь Сергеевич Полющенков**
ООО НПО «Рубикон – Инновация», кандидат технических наук, инженер отдела № 36, Россия, Смоленск, e-mail: polyushenckov.igor@yandex.ru

# Разработка контроллера электромеханического датчика положения

**Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Электромеханические датчики положения, в том числе синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы, по сравнению с датчиками, основанными на других физических принципах, обладают большей надежностью, простотой конструкции и устойчивостью к сложным условиям эксплуатации. Это делает их привлекательными для применения в различных системах управления движением, в которых требуется измерение положения вала исполнительного механизма. Однако для использования таких датчиков требуется специальные программно-аппаратные устройства – контроллеры, которые обеспечивают их работу. Разработка такого контроллера, который осуществляет генерирование, захват и обработку сигналов синусно-косинусного вращающегося трансформатора, и стала задачей настоящего исследования.
**Материалы и методы.** При разработке контроллера синусно-косинусного вращающегося трансформатора применены методы системного анализа электрических, электромагнитных и информационных процессов и средств их осуществления, методы разработки программного обеспечения и методы экспериментальных исследований.
**Результаты.** Дано описание контроллера синусно-косинусного вращающегося трансформатора в фазовом режиме с учетом аппаратных средств и вычислительных ресурсов реализующего его микроконтроллера. При этом физические процессы соотнесены с информационными процессами, связанными с генерированием, захватом и обработкой сигналов. Выявлены причины снижения точности измерения положения. Для их учета и устранения применены различные технические решения, среди которых согласование физических и информационных процессов, учет времени выполнения вычислений микроконтроллером, анализ корректности результатов измерения положения и их сглаживание по методу скользящего среднего. Разработано программное обеспечение контроллера, которое может послужить типовым элементом для микропроцессорных систем управления движением. Получены экспериментальные данные, иллюстрирующие достижение результата разработки.
**Выводы.** Применение различных технических решений позволило обеспечить точность измерения положения до десятой доли градуса при высокой интенсивности обновления информации. В результате проведения исследования дано детальное и комплексное решение задачи разработки контроллера синусно-косинусного вращающегося трансформатора, что составляет научную и практическую ценность приведенных материалов. Полученные результаты могут быть применены в различных системах управления движением и послужить основой для разработки контроллеров различных электромеханических датчиков положения.

**Ключевые слова:** электромеханический датчик положения, синусно-косинусный вращающийся трансформатор, микропроцессорные системы управления движением, микропроцессорная техника, вычислительный алгоритм

**Igor Sergeevich Polyuschenkov**
LLC R&D Company “Rubicon – Innovation”, Candidate of Engineering Sciences, Engineer, Department № 36, Russia, Smolensk, e-mail: polyushenckov.igor@yandex.ru

# Development of controller for electromechanical position sensor

**Abstract**

**Background.** Electromechanical position sensors, including sine-cosine rotary transformers, compared to sensors based on other physical principles, have greater reliability, a simple design and resistance to difficult operating conditions. This makes them attractive for use in various motion control systems that require measurement of the position of the actuator axis. However, the use of such sensors requires special hardware and software devices – controllers that ensure their operation. This article is devoted to the development of such a controller, which generates, captures, and processes signals of the sine-cosine rotary transformer.
**Materials and methods.** When developing the controller of the sine-cosine rotary transformer, methods of system analysis of electrical, electromagnetic and information processes and means of their implementation, methods of software development, as well as methods of experimental research were applied.
**Results.** A description of the controller of a sine-cosine rotary transformer in phase mode is given, taking into account the hardware and computing resources of the microcontroller which implements it. At the same time, physical processes are correlated with information processes associated with the generation, capture and processing of signals. The reasons for the decrease in the position measurement accuracy are revealed. Various technical solutions have been applied to take into account and eliminate them. Among them are the coordination of physical and information processes, taking

© Полющенков И.С., 2023
Вестник ИГЭУ, 2023, вып. 4, с. 36–45.

into account the execution time of calculations by the microcontroller, analysis of the correctness of the position measurement results and their smoothing according to moving average method. The controller software has been developed, which can serve as a typical element for microprocessor-based control systems. Experimental results are obtained, illustrating the achievement of the development result.
**Conclusions.** Application of various technical solutions has made it possible to ensure the accuracy of position measurement up to a tenth of a degree with a high intensity of information updating. As a result of the study, a detailed and comprehensive solution of the developing a controller for a sine-cosine rotating transformer problem is given, which is the scientific and practical value of the materials presented in the article. The results obtained can be applied in various motion control systems and serve as the basis for the development of controllers for various electromechanical position sensors.

**Key words:** electromechanical position sensor, sine-cosine rotary transformer, microprocessor motion control system, microprocessor technology, computational algorithm

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.4.036-045

**Введение.** Для работы следящих систем и в целом систем регулирования положения [1–3], распространенных в промышленном оборудовании, необходима достоверная информация о положении валов исполнительных механизмов, которая своевременно поступает на электроприводы, приводящие их в движение. Среди датчиков положения, основанных на различных физических принципах и обеспечивающих системы управления информацией, благодаря сравнительно высокой точности и неприхотливости к условиям эксплуатации выделяются электромеханические датчики положения и, в частности, синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (СКВТ), которые имеют статор и ротор, снабженные обмотками [4, 5].

Для работы электромеханических датчиков, в том числе СКВТ, требуются сравнительно сложные функционально завершенные устройства – контроллеры, осуществляющие формирование, захват и обработку сигналов. Современная элементная база электроники и микропроцессорной техники служит основой для программно-аппаратной реализации таких контроллеров. От технического уровня контроллера СКВТ зависит точность измерения положения и его своевременность по отношению к вращению вала исполнительного механизма.

Электромагнитные процессы в СКВТ протекают таким образом, что при наличии сигналов возбуждения измерительные сигналы имеют характеристики, взаимосвязанные с угловым положением ротора по отношению к статору [4, 5]. В зависимости от использования обмоток статора и ротора для возбуждения или снятия измерительного сигнала, СКВТ может работать в амплитудном или фазовом режиме. Анализ [4–8] позволяет сделать вывод, что у контроллера СКВТ в амплитудном режиме принципиально можно достигнуть большего технического уровня, чем у контроллера СКВТ в фазовом режиме.

При использовании СКВТ в амплитудном режиме кроме микроконтроллера, выполняющего сравнительно сложные математические вычисления, применяются достаточно дорогие специализированные микросхемы, например 1310НМ025 или IPS2550, предназначенные для формирования и обработки сигналов [6–8]. Это связано с ограниченностью вычислительных ресурсов и функциональности встроенных аппаратных модулей микропроцессорной техники общего назначения. В частности, это касается формирования высококачественного синусоидального сигнала возбуждения, имеющего частоту в несколько десятков или сотен килогерц, который подается на обмотку ротора, и демодуляции измерительных сигналов такой же частоты, снимаемых с фаз статора, т. е. выделения их огибающих.

В то же время функциональности встроенных аппаратных модулей и вычислительных ресурсов микропроцессорной техники общего назначения вполне достаточно для генерирования, захвата и обработки сигналов при реализации контроллера СКВТ в фазовом режиме. Поэтому такой контроллер выглядит более доступным для разработки, в том числе по стоимости, но не менее эффективным для измерения углового положения вала исполнительного механизма по сравнению с контроллером СКВТ в амплитудном режиме.

Целью исследования является разработка программно-аппаратных средств контроллера электромеханического датчика положения – синусно-косинусного вращающегося трансформатора, работающего в фазовом режиме.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- на основе принципа работы СКВТ в фазовом режиме составлено функциональное описание его контроллера с учетом вычислительных ресурсов микропроцессорной техники и ее возможностей по генерированию, захвату и обработке сигналов;
- выявлены ограничивающие факторы, в том числе влияющие на точность измерения положения контроллером СКВТ, после чего выбраны и применены технические решения для их учета или устранения;
- экспериментально оценены предлагаемые технические решения и результат разработки контроллера СКВТ.

**Методы исследования**. Рассмотрим принцип работы СКВТ в фазовом режиме, а

также элементы реализации его контроллера (рис. 1, 2). Согласно функциональной схеме, показанной на рис. 1, фазы статора СКВТ, расположенные по осям $\alpha$ и $\beta$, питаются синусоидальными напряжениями $u_\alpha$ и $u_\beta$, имеющими период $T_\Omega$ и частоту $f_\Omega$. Эти напряжения формируются схемами питания фаз СП$\alpha$ и СП$\beta$ в зависимости от сигналов $u_{\sin}$ и $u_{\cos}$, генерируемых микроконтроллером. Напряжения $u_\alpha$ и $u_\beta$ являются квадратурными, т.е. смещены на 90 электрических градусов (рис. 2), поэтому в результате протекания электромагнитных процессов в СКВТ возникает вращающееся магнитное поле. Под его действием в обмотке ротора, которая ориентирована по оси *d*, возникает электродвижущая сила (ЭДС), снимаемая со скользящих контактов как сигнал $u_d$, показанный на рис. 1 и 2. Возможна и бесконтактная конструкция СКВТ. Сигнал $u_к$, также имеющий синусоидальную форму с периодом $T_\Omega$, смещен на интервал времени $\Delta T$, продолжительность которого по отношению к периоду $T_\Omega$ пропорциональна углу $\Theta$ между осью $\alpha$ статора и осью *d* ротора. Указанный интервал времени $\Delta T$ является величиной, которую должен измерять разрабатываемый контроллер СКВТ.

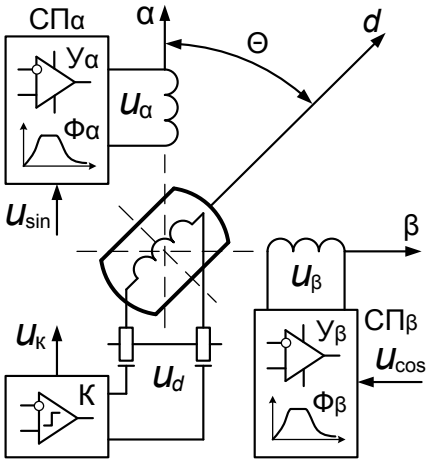



Рис. 1. Функциональная схема контроллера СКВТ в фазовом режиме

Характеристика «вход–выход» СКВТ в фазовом режиме показана на рис. 3. По вертикальной оси отложен параметр $\lambda$, являющийся отношением $\Delta T$ к $T_\Omega$:

$$\lambda = \frac{\Delta T}{T_\Omega}. \quad (1)$$

Такая характеристика «вход–выход» является линейной в пределах одного оборота ротора СКВТ, когда параметр $\lambda$ изменяется от 0 до 1 при изменении угла $\Theta$ в пределах от 0 до 360 градусов, или $2\pi$ радиан.

Чтобы измерить продолжительность интервала $\Delta T$, сигнал $u_d$ с помощью компаратора К преобразуется к логическому виду $u_к$, как показано на рис. 2. Такой сигнал $u_к$ компаратора удобен для ввода в микроконтроллер при измерении $\Delta T$ с помощью его различных встроенных модулей [9].

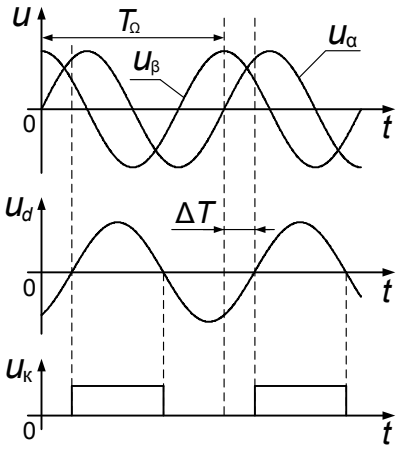



Рис. 2. Временные диаграммы сигналов СКВТ в фазовом режиме

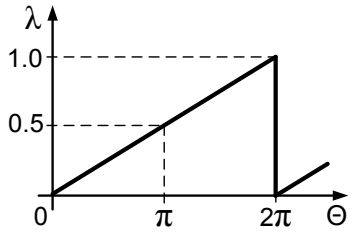



Рис. 3. Характеристика «вход–выход» СКВТ в фазовом режиме

Вернемся к формированию напряжений $u_\alpha$ и $u_\beta$, питающих статор. Чтобы эти напряжения были синусоидальными, микроконтроллер должен формировать сигналы $u_{\sin}$ и $u_{\cos}$, имеющие синусоидальную широтно-импульсную модуляцию (ШИМ). Для улучшения гармонического состава напряжений $u_\alpha$ и $u_\beta$ при их формировании предназначена центрированная опорная последовательность счета $U_{TIM}$ таймера-генератора в режиме Advanced PWM [9], как показано на рис. 4. Для удобства размах счетной опорной последовательности $U_{TIM}$ показан в диапазоне от нуля до 100 %. Физически он выражен в машинных циклах, которые являются единицами счета времени при генерировании ШИМ. Частота ШИМ $f_{PWM}$ составляет 200 кГц, а обратная ей продолжительность периода опорной счетной последовательности $T_{PWM}$ = 5 мкс.

Согласно временным диаграммам, показанным на рис. 4, от уровня $U_з$ зависит величина скважности генерируемого сигнала $u_{\sin}$ или $u_{\cos}$. Поэтому величина $U_з$ должна изменяться во времени по синусоидальному закону с периодом $T_\Omega$. При этом закон изменения $U_з(t)$ является центрированным относительно уровня $U_0$ = 50 % скважности (рис. 4). Следовательно, сигналы $u_{\sin}$ и $u_{\cos}$ имеют постоянную составляющую, равную половине размаха опорной счетной последовательности $U_{TIM}$.

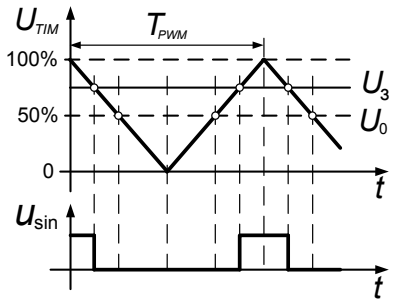



Рис. 4. Генерирование сигнала с ШИМ

Рассмотрим простейший способ расчета скважности ШИМ, а именно, интервальную аппроксимацию синусоидального сигнала (рис. 5). Этот способ является наименее затратным по вычислительным ресурсам при микропроцессорной реализации. Согласно графику на рис. 5, значение скважности ШИМ на каждом из интервалов, имеющих продолжительность $\tau$, равно половине суммы значений синусоиды на границах этого интервала. Кроме того, при расчете скважностей для каждого из таких интервалов требуется учесть центрирование опорной счетной последовательности $U_0$ = 50 % скважности и ее размах от нуля до 100 %.

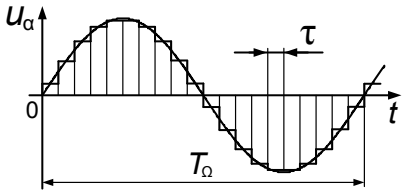



Рис. 5. Аппроксимация синусоидального сигнала

Частота $f_a$ составляющей сигналов $u_{sin}$ и $u_{cos}$, вызванной их аппроксимацией (рис. 5), определяется следующим соотношением:

$$f_a = f_\Omega Q, \qquad (2)$$

где $Q$ – число интервалов, имеющих продолжительность $\tau$ на периоде $T_\Omega$.

Очевидно (рис. 5), что величина $Q$ должна быть кратна четырем, чтобы на каждую четверть периода синусоидального сигнала приходилось целое число интервалов продолжительностью $\tau$. С ростом числа $Q$ синусоидальность формы сигналов $u_{sin}$ и $u_{cos}$ возрастает. В данной разработке контроллера СКВТ использовано значение $Q$ = 20. Могут быть применены и другие способы вычисления скважности ШИМ для синусоидальной модуляции при формировании указанных выше сигналов, которые позволяют с большей точностью воспроизвести их синусоидальную форму, что, однако, связано с ростом вычислительной нагрузки микроконтроллера.

Схемы питания СП$\alpha$ и СП$\beta$ осуществляют фильтрацию сигналов $u_{sin}$ и $u_{cos}$, а также их усиление до уровня амплитудного значения 5 В и уровня мощности, необходимого для питания фаз $\alpha$ и $\beta$ статора СКВТ. Фильтры Ф$\alpha$ и Ф$\beta$ в составе схем питания являются полосовыми и рассчитаны так, чтобы с минимальными искажениями пропускать основную гармоническую составляющую, имеющую частоту $f_\Omega$, подавляя при этом более высокочастотные составляющие с частотами $f_a$ и $f_{PWM}$, имеющиеся в сигналах $u_{sin}$ и $u_{cos}$ в результате их дискретного формирования. Кроме того, фильтры Ф$\alpha$ и Ф$\beta$ удаляют постоянную составляющую сигналов $u_{sin}$ и $u_{cos}$, присутствующую в них в результате их формирования с центрированием на уровне $U_0$ = 50 % (рис. 4). Каждая из схем питания СП$\alpha$ и СП$\beta$ с функцией фильтра реализована на индивидуальном для каждой из них операционном усилителе У$\alpha$ и У$\beta$ типа К157УД1, допустимый выходной ток которого составляет несколько сотен миллиампер.

Компаратор, который сравнивает синусоидальный сигнал $u_d$ с нулевым уровнем и генерирует сигнал $u_к$, также реализован на операционном усилителе, но высокая нагрузочная способность выходной цепи от него не требуется. Принципы разработки схем питания СП$\alpha$ и СП$\beta$ фаз статора СКВТ, а также схемы компаратора и примеры, иллюстрирующие их, описаны в [10].

Частота $f_\Omega$ напряжений $u_\alpha$ и $u_\beta$ находится, как правило, в диапазоне 1,0–3,0 кГц. Ее величина выбирается как компромисс между интенсивностью обновления информации, которая важна при вращении ротора СКВТ, разрешающей способностью при его измерении и вычислительной нагрузкой микроконтроллера. Очевидно, что информация о положении $\Theta$ обновляется каждый период $T_\Omega$, однако его продолжительность формируется дискретно по времени согласно выражению

$$T_\Omega = \frac{1}{f_\Omega} = T_0 h = \frac{h}{f_0}, \qquad (3)$$

где $f_0$ и $T_0$ – частота и продолжительность машинных циклов (м.ц) микроконтроллера; $h$ – число машинных циклов на периоде $T_\Omega$.

Аналогичным образом дискретно осуществляется счет времени $\Delta T$:

$$\Delta T = T_0 k, \qquad (4)$$

где $k$ – число машинных циклов на интервале $\Delta T$, причем $k < h$.

Из (3) и (4) следует, что формирование сигналов, как и счет времени $\Delta T$, осуществляется дискретно с разрешающей способностью $T_0$, зависящей от тактовой частоты микроконтроллера $f_{cpu}$. Поэтому с ростом частоты $f_\Omega$ период $T_\Omega$ формируется из меньшего количества $h$ машинных циклов, что приводит к снижению точности измерения интервала времени $\Delta T$, а значит, и углового положения $\Theta$ ротора СКВТ. Следует отметить, что продолжительность машинного цикла $T_0$ равна четырем периодам тактовой ча-

стоты микроконтроллера $f_{cpu}$. В данной разработке контроллера СКВТ приняты их значения $f_\Omega$ = 2,0 кГц, а $T_\Omega$ = 500 мкс.

На рис. 6 показана блок-схема программного обеспечения контроллера для осуществления описанного выше принципа функционирования СКВТ. Как дополнение к этой блок-схеме на рис. 7 показано назначение используемых линий портов микроконтроллера STM32 согласно [9].

Рис. 6. Блок-схема программного обеспечения контроллера СКВТ в фазовом режиме

Каждой из задач, выделенной на основе рассмотренного принципа работы СКВТ, назначен приоритет, чтобы обеспечить своевременное выполнение вычислений и обновление информации. Меньшему номеру соответствует более высокий приоритет выполнения, как у микроконтроллера STM32 [9]. Задачи, требующие циклического выполнения, отнесены в обработку прерываний при переполнении таймеров. Например, Таймер 3 автоматически перезапускается по прерыванию при своем переполнении с интервалом 25 мкс. При каждом таком прерывании задается очередное значение скважности ШИМ из массива, заданного таблично в целях экономии вычислительных ресурсов и сокращения времени вычислений, для формирования напряжений $u_\alpha$ и $u_\beta$ согласно рис. 4 и 5. Таким образом, $Q$ = 20 таких интервалов образуют период $T_\Omega$ = 500 мкс при $f_\Omega$ = 2,0 кГц. Таймер 2 осуществляет счет времени $\Delta T$. Согласно временным диаграммам на рис. 2, он перезапускается с нулевого начального значения в начале каждого периода напряжения $u_\alpha$, питающего фазу $\alpha$ статора СКВТ, и настроен таким образом, чтобы увеличивать значение счетного регистра на единицу каждый машинный цикл без предделителя. Его переполнение должно наступать примерно через 750 мкс, чего не происходит, так как периодичность перезапуска $T_\Omega$ = 500 мкс.

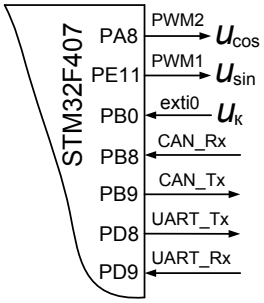



Рис. 7. Назначение линий микроконтроллера

Некоторые из задач, не требующие циклического повторения, выполняются по мере необходимости при обработке прерываний, вызываемых установкой системных флагов. Например, считывание значения $\Delta T$ из счетного регистра Таймера 2 при детектировании переднего фронта сигнала $u_к$ происходит по внешнему прерыванию exti0, имеющему самый высокий приоритет. Далее, чтобы снизить пиковую вычислительную нагрузку, обработка этого значения $\Delta T$ при запрещенном прерывании exti0 осуществляется в подпрограмме низкоприоритетного прерывания exti1, вызываемого при программной установке системного флага. Причина применения такого технического решения будет рассмотрена далее.

Для разработки и отладки программного обеспечения, а также контроля его выполнения и отслеживания отдельных переменных предназначено сопряжение контроллера СКВТ с персональным компьютером при помощи асинхронного приемопередатчика UART (Universal Asynchronous Receive-Transmitter) с преобразованием в интерфейс USB. Согласно схеме на рис. 6, доступ к приемнику UART осуществляется по прерыванию при переполнении Таймера 4 с интервалом 5 мс. Для сопряжения контроллера СКВТ с электроприводом или системой управления верхнего уровня предназначен сетевой интерфейс CAN (Controller Area Network). При таком сопряжении для доступа к результату измерения положения и к служебной информации контроллера предусмотрен набор из нескольких команд. Обмену данными через интерфейс CAN назначен низкий приоритет, по сравнению с выполнением задач генерирования, захвата и обработки сигналов. Для сопряжения контроллера с системой управления кроме сетевой шины CAN могут быть использо-

ваны сетевые интерфейсы I2C (Inter Integrated Circuit) и SPI (Serial Peripheral Interface).

Очевидно, что конфигурирование программных средств контроллера в зависимости от используемого типа СКВТ не требуется. Это связано с использованием универсальных измерительных сигналов, показанных на рис. 2.

**Результаты исследования.** На основе приведенного выше описания контроллера СКВТ и предложенных технических решений разработаны его программно-аппаратные средства. При разработке аппаратных средств контроллера была использована отладочная плата Discovery с микроконтроллером STM32F407. Схемы питания фаз СКВТ, компараторы и элементы для согласования их сигналов с микроконтроллером были размещены на макетной плате. В качестве датчика при разработке, отладке и исследовании контроллера СКВТ использовался синусно-косинусный вращающийся трансформатор ВТМ – 1Г.

В качестве средства разработки программного обеспечения контроллера использовались методы и инструменты модельно-ориентированного программирования, а именно библиотека Waijung Blockset [11] из состава системы компьютерной математики Matlab. При этом модельные блоки Waijung Blockset были применены в качестве обработчиков аппаратных модулей микроконтроллера STM32, используемых для захвата и генерирования сигналов, и в качестве элементов для компоновки структуры программного обеспечения [12] (см. рис. 6). Элементы программного обеспечения, выполняющие обработку сигналов и данных, а также другие вычисления, были разработаны на языке С в виде функционально самостоятельных подпрограмм [12].

Специальное приложение для визуализации данных, принятых персональным компьютером от контроллера СКВТ по линии связи UART с преобразованием в интерфейс USB, позволило отслеживать изменение переменных программного обеспечения, чтобы оценить результаты применения различных технических решений. Были использованы следующие значения параметров: $f_{cpu}$ = 84 МГц, $T_0 \approx$ 47,6 нс, $f_{PWM}$ = 200 кГц, $f_\Omega$ = 2,0 кГц, $T_\Omega$ = 500 мкс, $Q$ = 20.

В ходе разработки и исследования результатов выявлены процессы и закономерности, снижающие характеристики контроллера СКВТ, для учета и устранения которых применены различные технические решения. Рассмотрим их подробно.

Согласно схеме на рис. 6, Таймер 2, измеряющий интервал времени $\Delta T$, который пропорционален $\Theta$, сбрасывается до нуля и начинает с него счет в начале каждого периода $T_\Omega$ напряжения, питающего фазу $\alpha$. Этот период образован интервалами $Q$, формируемыми по прерыванию при переполнении Таймера 3. Таким образом, Таймер 2, осуществляя счет времени $\Delta T_{max}$ между своими сбросами, измеряет продолжительность периода $T_\Omega$. Счет времени Таймером 2 может служить мерой стабильности выполнения вычислений во времени.

Очевидно, что действительная величина периода $T_\Omega$, а значит, и величина $f_\Omega$ несколько отличаются от заданной величины из-за выполнения микроконтроллером сопутствующих вычислений при формировании сигналов $u_\alpha$ и $u_\beta$, которые занимают некоторое время. Однако экспериментально показано, что период $\Delta T_{max} \approx T_\Omega$ в широком диапазоне угловых положений ротора СКВТ является стабильной величиной, примерно равной заданной 500 мкс, формируется с точностью до одного машинного цикла и состоит из 41988 м.ц. Следовательно, предельная точность $\delta_{пр}$ измерения положения составляет $0{,}0086^0$ на машинный цикл, а предельная разрешающая способность $\Delta_{пр}$ равна 117 м.ц. на один градус по следующему соотношению:

$$\delta_{пр} = \frac{1}{\Delta_{пр}} = \frac{360}{T_\Omega}. \quad (5)$$

Очевидно, что в действительности точность измерения положения значительно снижена по сравнению с приведенной выше величиной, рассчитываемой по (5), и ограничена свойствами компаратора – его порогом срабатывания и быстродействием, которые обладают некоторым разбросом и вероятностными свойствами. Кроме того, очевидно, что электрические и электромагнитные процессы в СКВТ протекают с некоторым разбросом параметров. Эти обстоятельства ставят вопрос о необходимости усреднения результатов измерения положения $\Theta$, полученных за несколько последовательных периодов $T_\Omega$.

В ходе отслеживания величины интервала $\Delta T$ (см. рис. 2), фиксируемой микроконтроллером при различных угловых положениях ротора СКВТ, при формировании сигнала $u_к$, т. е. при переключении логических уровней в зависимости от величины сигнала $u_d$ по отношению к нулевому уровню, выявлена возможность дребезга компаратора. Это явление, объясняемое физическими свойствами сигналов, которые сравнивает компаратор, приводит к тому, что при переходе сигнала $u_d$ от положительной полуволны к отрицательной полуволне, что происходит на половине его периода в сигнале компаратора $u_к$, кроме заднего фронта могут сформироваться дополнительные импульсы. Передние фронты этих импульсов, в зависимости от их электрических характеристик, таких как логический уровень и темп нарастания, микроконтроллер может воспринимать как полезный сигнал, которым является передний фронт сигнала $u_к$, генерируемый в начале периода сигнала $u_d$ согласно рис. 2. В результате описанного выше явления продолжительность

$\Delta T$ может быть измерена некорректно, т.е. с ошибкой, имеющей дискретную величину, приблизительно равную $0{,}5T_\Omega$ с точностью до времени, занимаемого сопутствующими вычислительными процессами.

Получение такого некорректного значения $\Delta T$ приводит к выходу результата измерения углового положения за пределы допуска по точности, каким бы этот допуск не был. Поэтому после выяснения причин возникновения описанного ошибочного результата был применен критерий корректности очередного ($i$+1)-го измерения, который описывается согласно следующим выражениям:

$$V_{i+1} = \left|\Delta T_{i+1} - \Delta T_i\right|; \quad (6)$$

$$T_m = \frac{mT_\Omega}{2}; \quad (7)$$

$$V_{i+1} < T_m, \quad (8)$$

где $T_m$ – пороговое значение; $m$ – коэффициент запаса, причем $0{,}6 < m < 1$.

Согласно (6), при получении очередного значения $\Delta T_{i+1}$, которое происходит на каждом периоде $T_\Omega$, требуется вычислить модуль его приращения $V_{i+1}$ по отношению к предыдущему значению $\Delta T_i$. При корректных значениях $\Delta T_i$ и $\Delta T_{i+1}$ величина $V_{i+1}$ не может быть велика, так как ротор СКВТ за интервал времени $T_\Omega \approx 500$ мкс не может повернуться на большой угол, например на треть или половину оборота. Поэтому величина $V_{i+1}$ при корректных значениях $\Delta T_i$ и $\Delta T_{i+1}$ ограничена величиной параметра $T_m$, рассчитываемого по (7), что описывается выражением (8). Если же по описанной выше причине получено некорректное значение $\Delta T_{i+1}$, которое отличается от значения, действительного для текущего положения ротора СКВТ, приблизительно на $0{,}5T_\Omega$, то условие (8) не выполняется. Выявленное таким образом ошибочное значение $\Delta T_{i+1}$ в дальнейших расчетах не учитывается, в том числе при расчете следующей ($i$+2)-й итерации $V_{i+2}$ по (6).

Как было отмечено выше, экспериментально установлено, что период $T_\Omega$ в широком диапазоне угловых положений ротора СКВТ является стабильной величиной. Однако при приближении ротора к границе оборота $\Theta \to 360^0$ в зоне, имеющей ширину $\Delta\Theta$ в несколько градусов, величина периода $\Delta T_{max}$ между сбросами Таймера 2 отклоняется от корректной величины $\Delta T_{max} \approx T_\Omega$, стабильной на протяжении остальной части оборота ротора. Установлено, что это явление связано с тем, что задачи детектирования переднего фронта сигнала $u_к$ компаратора, считывания значения счетного регистра Таймера 2, начала очередного периода $T_\Omega$ напряжений статора $u_\alpha$ и $u_\beta$, а также сброса счетного регистра Таймера 2 до нулевого значения должны быть выполнены в близкие моменты времени. Поскольку вычисления для каждой из перечисленных задач выполняются за конечное время, в зоне $\Delta\Theta$, в зависимости от конкретного момента времени захвата переднего фронта $u_к$, они выстраиваются в последовательность и создают пиковую вычислительную нагрузку, препятствуя строго своевременному своему выполнению. Например, программный сброс Таймера 2 и начало очередного периода его счета происходят с некоторым отклонением по отношению к началу периода $T_\Omega$.

Было установлено, что зона положений $\Delta\Theta$ до границы оборота ротора СКВТ $\Theta \to 360^0$, при которой указанное явление наблюдается, а также отклонения $dT$ продолжительности $\Delta T_{max}$ от его стабильной величины зависят от приоритетов выполнения перечисленных задач и связанного с этим времени выполнения вычислений. Сказанное относится ко времени, затрачиваемому на вызов подпрограмм, а также к порядку расположения отдельных синтаксических конструкций в подпрограммах. Очевидно, что кроме сбоя счета Таймера 2 вычисления при прерывании от Таймера 3, связанные с формированием напряжений $u_\alpha$ и $u_\beta$, выполняются несколько несвоевременно. Наличие отклонения счета $dT$ означает нелинейность характеристики «вход–выход» СКВТ, показанной на рис. 3, в зоне $\Delta\Theta$.

Чтобы уменьшить $dT$ и зону $\Delta\Theta$, были приняты меры по снижению времени выполнения вычислений и распределению их по времени. Как показано на рис. 6, по внешнему прерыванию exti0 при детектировании переднего фронта сигнала $u_к$ компаратора считывается значение счетного регистра Таймера 2, равное $\Delta T$ и выраженное в машинных циклах. Далее внешнее прерывание exti0 запрещается. Таким образом, программная обработка этого прерывания занимает минимальное время. Обработка полученного значения $\Delta T$ происходит в низкоприоритетном прерывании exti1, вызываемом при программной установке системного флага. Чтобы в большей степени распределить вычисления во времени, этот флаг устанавливается при обработке одного из $Q$ прерываний при переполнении Таймера 3, которое следует по времени за считыванием $\Delta T$. Далее внешнее прерывание exti0 разрешается. В результате отклонения счета Таймера 2 наблюдаются в малой области $\Delta\Theta$ от $\Theta \approx 358{,}5^0$ до $\Theta \to 360^0$. Максимальное одномоментное отклонение счета времени Таймером 2 сокращено до $dT \approx 45$ м.ц.

Рассмотрим сглаживание по методу скользящего среднего, согласно которому при каждом $j$-м измерении $\Theta$ вычисляется их сумма для $N$ последовательных измерений:

$$\Theta_{\Sigma.j} = \sum_{n=1}^{N} \Theta_{n.j}. \quad (9)$$

Если при очередном ($j$+1)-м измерении положения получена его величина $\Theta_{0.j+1}$ при $n = 0$, то $N$ последовательных измерений поло-

жения $\{\Theta_{n.j}\}$ сдвигаются в направлении возрастания индексов $n$ и $j$ согласно следующим выражениям, причем $n \geq 1$:

$$\Theta_{n+1.j+1} = \Theta_{n.j}\,; \tag{10}$$

$$\Theta_{1.j+1} = \Theta_{0.j+1}. \tag{11}$$

Согласно (11), значение $\Theta_{0.j+1}$ в массиве $\{\Theta_{n.j+1}\}$ становится элементом $\Theta_{1.j+1}$. Далее, чтобы уменьшить объем вычислений, из суммы $\Theta_{\Sigma.j}$ вычитается самый «старый» элемент $\Theta_{N+1.j+1}$, рассчитанный по (10), а самый «новый» элемент $\Theta_{1.j+1}$ прибавляется к этой сумме согласно следующему выражению:

$$\Theta_{\Sigma.j+1} = \Theta_{\Sigma.j} + \Theta_{1.j+1} - \Theta_{N+1.j+1}. \tag{12}$$

Итоговое сглаженное значение положения, являясь средней величиной за $N$ измерений, вычисляется по формуле

$$\Theta_{j+1} = \frac{\Theta_{\Sigma.j+1}}{N}. \tag{13}$$

В дальнейшем для простоты порядковый индекс $j$+1 для очередного значения положения $\Theta$ будет пропущен. Следует отметить, что положения $\Theta$ в (9)–(13) имеют целочисленный формат int32 и размерность машинных циклов, как у измеренной продолжительности интервала $\Delta T$.

На рис. 8 приведены экспериментальные графики, иллюстрирующие измерение углового положения ротора СКВТ с помощью разработанного контроллера. Оно приведено к размерности градусов. Эти графики получены с помощью упомянутого выше приложения для персонального компьютера. Во всех случаях ротор СКВТ установлен на одинаковый угол. Точки на графиках показывают область разброса $\mu$ экспериментальных значений положения $\Theta$ по вертикальным осям после сглаживания по (9)–(13). Очевидно, что действительное положение ротора СКВТ находится в середине зоны $\mu$. По горизонтальным осям отложено время получения очередного значения положения $\Theta$ персональным компьютером от контроллера.

Согласно этим графикам (рис. 8), снижение частоты $f_\Omega$ напряжений, подаваемых на фазы статора СКВТ, и увеличение числа $N$ точек выборки положения, используемых при усреднении результата, приводит к увеличению точности измерений. Таким образом, при частоте напряжений статора $f_\Omega$ = 2,0 кГц и числе измерений $N$ = 15 достигнута ширина зоны разброса положения $\mu \approx 0{,}08^0$. Эта величина соизмерима с погрешностями, связанными с конструкцией СКВТ. Для сравнения, при $f_\Omega$ = 2,0 кГц и отсутствии сглаживания зона разброса $\mu$ достигает $0{,}6^0$, что, очевидно, связано с разбросом времени срабатывания компаратора К (см. рис. 1), который генерирует сигнал $u_к$, показанный на рис. 2.

Многократное повторение экспериментов при различных положениях ротора СКВТ и некоторых значениях частоты $f_\Omega$ и числа измерений $N$ подтвердило указанные выше закономерности, а также показало примерное совпадение ширины зон разброса измеренного положения $\Theta$ с зонами разброса $\mu$, показанными на рис. 8. То обстоятельство, что значения $\Theta$ (рис. 8) являются дискретными, имеющими несколько уровней, связано с их автоматическим округлением при отображении приложением.

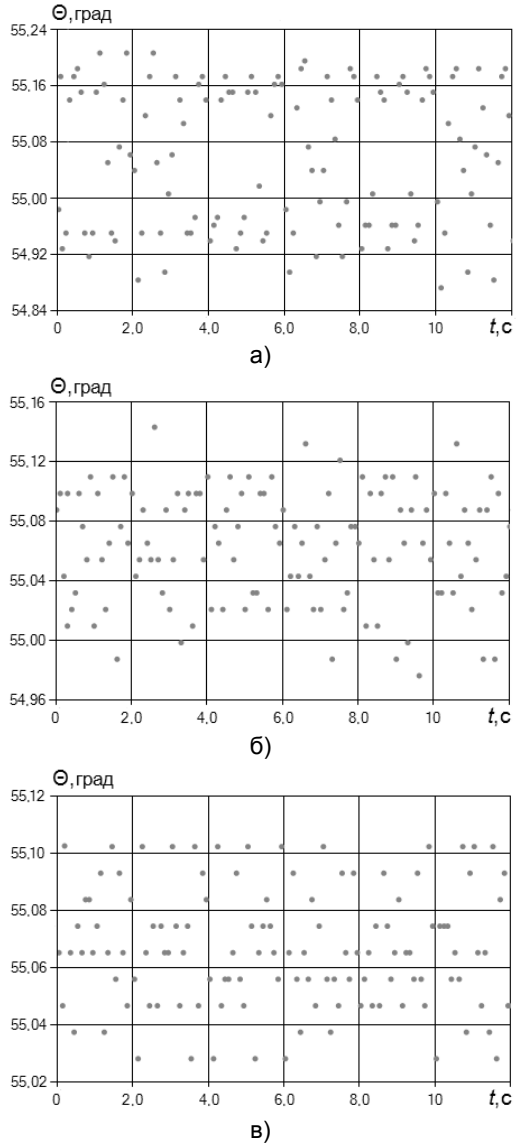



Рис. 8. Экспериментальные графики измеренного положения ротора СКВТ: а – при $f_\Omega$ = 2,5 кГц и $N$ = 10; б – при $f_\Omega$ = 2,0 кГц и $N$ = 10; в – при $f_\Omega$ = 2,0 кГц и $N$ = 15

Очевидно, что описанное выше усреднение, или сглаживание, результатов измерения положения вносит инерционность в работу замкнутой системы автоматического управления. Степень этого влияния зависит от скорости вращения вала исполнительного механизма, на котором установлен датчик СКВТ. Для тихоходных высокомоментных механизмов, валы которых соединены с электрическими двигателями через редукторы и другие кинематические пе-

редачи с большим передаточным числом, влияние описанной инерционности минимально [1, 2], а полезный эффект от повышения точности измерения положения проявляется в большей степени.

Также было экспериментально установлено получение некорректного результата измерения положения на границе оборота ротора СКВТ, которое связано с тем, что в массиве $\{\Theta_{n.j}\}$, предназначенном для вычисления скользящего среднего $N$ элементов, одновременно присутствуют значения положений $\Theta \to 360^0$ и $\Theta \to 0$. Если вал приводного механизма, на котором установлен СКВТ, совершает движение в секторе, не превышающем один его оборот, то указанное выше обстоятельство не оказывает влияния на систему управления, замкнутую по датчику положения, а условное начало отсчета, т. е. нулевое значение положения в контроллере СКВТ, может быть задано программно.

В разработанном контроллере СКВТ получение ошибочного результата, описанное выше, устранено путем расширения диапазона измерения углового положения $\Theta$ из диапазона 0–360$^0$ до угла поворота $\varphi$, изменяющегося в более широких пределах, принимая, в том числе, и отрицательные значения. Для этого очередное ($i$+1)-е значение $V_{i+1}$, рассчитанное по (6), проверенное на корректность по (7) и (8), сравнивается с пороговым значением:

$$T_\sigma = \sigma T_\Omega , \qquad (14)$$

где $\sigma$ – коэффициент, причем $0{,}8 < \sigma < 0{,}9$.

Если $V_{i+1}$ превышает пороговое значение $T_\sigma$, то детектируется прохождение ротором СКВТ границы оборота, направление которого зависит от знака разности $\Delta T_i$ и $\Delta T_{i+1}$. Это следует из периодичности характеристики «вход–выход» СКВТ в фазовом режиме (см. рис. 3). Число детектированных таким образом оборотов учитывается при расчете угла поворота $\varphi$ в зависимости от углового положения $\Theta$. Далее значения угла поворота $\varphi_{n.j}$ должны подвергаться сглаживанию согласно (9)–(13). Угол поворота $\varphi$, в отличие от углового положения $\Theta$, не имеет разрывов на границах оборотов. Значит, обозначенная задача обеспечения корректного измерения положения ротора СКВТ на границах его оборотов с обеспечением переходов между оборотами при осуществлении сглаживания решена. Величина угла поворота $\varphi$ ограничена разрядной сеткой числового формата int32 при вычислениях по (9)–(13).

Описанный способ расширения диапазона углового положения $\Theta$ до угла поворота $\varphi$ не противоречит проверке корректности результатов измерения по (7) и (8), так как возможные некорректные значения $\Delta T$ не превышают пороговое значение $T_\sigma$, рассчитанное по (14), и примерно равны величине $T_m$, рассчитанной по (7).

Следует отметить, что между включением питания разработанного контроллера СКВТ и его готовностью к выдаче данных об измеренном угловом положении ротора предусмотрена программно формируемая пауза. Она требуется для окончания инициализации микроконтроллера и завершения переходных процессов при включении напряжений питания фаз статора СКВТ, а также для первоначального заполнения $N$ элементов выборки измеренного положения $\Theta$, или угла поворота $\varphi$.

**Выводы.** Разработка контроллера СКВТ в фазовом режиме потребовала детального учета физических процессов, на которых основан его принцип работы. В частности, потребовалось их согласование, учитывая время выполнения программного обеспечения, с вычислительными процессами, осуществляемыми микропроцессорной техникой при генерировании, захвате и обработке сигналов с использованием встроенных аппаратных модулей.

В целях повышения точности измерений положения до 0,08$^0$ выбрана частота напряжений, питающих статор СКВТ, и способ их формирования, а между встроенными модулями микроконтроллера распределены задачи генерирования, захвата и обработки сигналов. Эти задачи имеют приоритеты и распределены во времени, чтобы снизить взаимное влияние при их выполнении и устранить пиковые вычислительные нагрузки микроконтроллера.

Для повышения точности измерения положения ротора СКВТ применена дополнительная обработка его результатов, а именно оценка их корректности и сглаживание по методу скользящего среднего.

**Список литературы**

1. **Анучин А.С.** Системы управления электроприводов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.

2. **Терехов В.М., Осипов О.И.** Системы управления электроприводов: учебник для вузов / под ред. В.М. Терехова. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 304 с.

3. **Егупов Н.Д.** Методы классической и современной теории управления: учебник. В 3 т. Т. 2. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 736 с.

4. **Розанов Ю.К., Соколова Е.М.** Электронные устройства электромеханических систем: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 272 с.

5. **Терехов В.М.** Элементы автоматизированного электропривода: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.

6. **Анучин А.С., Подзорова В.С., Кульманов В.И., Шпак Д.М.** Метод цифровой обработки сигналов синусно-косинусного инкрементального датчика положения для исключения влияния постоянной составляющей этих сигналов // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 6. – С. 33–39. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.6.033-039.

7. **Прокофьев Г.В., Большаков К.Н., Стахин В.Г., Обеднин А.А.** Разработка микросхемы обработки

сигнала с синусно-косинусных датчиков положения с высоким разрешением // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 3(176). – С. 30–42.

8. **Войтицкий С.А., Ивахно В.С., Ивахно Н.В.** Цифровая система обработки сигналов вращающегося трансформатора на основе DSP-микроконтроллера в составе электропривода // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2012. – № 8. – С. 184–188.

9. **STM32** Arm Cortex Microcontrollers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.st.com (дата обращения 16.12.2022).

10. **Хоровиц П., Хилл У.** Искусство схемотехники. В 2 т. Т. 1: пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 598 с.

11. **Waijung** Blockset [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://waijung.aimagin.com (дата обращения 19.01.2023).

12. **Polyuschenkov I.** Model-oriented Programming Technique in The Development of Electric Drive Control System // 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED), 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/IWED.2019.8664388.

**References**

1. Anuchin, A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control systems of electric drives]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2015. 373 p.

2. Terekhov, V.M., Osipov, O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control systems of electric drives]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2006. 304 p.

3. Egupov, N.D. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii upravleniya. V 3 t., t. 2* [Classic and Modern Methods of Control Theory. In 3 vol., vol. 2]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im N.E. Baumana, 2000. 736 p.

4. Rozanov, Yu.K., Sokolova, E.M. *Elektronnye ustroystva elektromekhanicheskikh sistem* [Electronic equipment of electromechanical systems]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2004. 272 p.

5. Terekhov, V.M. *Elementy avtomatizirovannogo elektroprivoda* [Elements of Automated Electric Drive]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 224 p.

6. Anuchin, A.S., Podzorova, V.S., Kul'manov, V.I., Shpak, D.M. Metod tsifrovoy obrabotki signalov sinusno-kosinusnogo inkremental'nogo datchika polozheniya dlya isklyucheniya vliyaniya postoyannoy sostavlyayushchey etikh signalov [Method for digital signal processing of a sine-cosine incremental encoder to eliminate the influence of the constant component of these signals]. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 6, pp. 33–39. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.6.033-039.

7. Prokof'ev, G.V., Bol'shakov, K.N., Stakhin, V.G., Obednin, A.A. Razrabotka mikroskhemy obrabotki signala s sinusno-kosinusnykh datchikov polozheniya s vysokim razresheniyem [Development of a signal processing chip from sine-cosine position sensors with high resolution]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 3(176), pp. 30–42.

8. Voytitskiy, S.A., Ivakhno, V.S., Ivakhno, N.V. Tsifrovaya sistema obrabotki signalov vrashchayushchegosya transformatora na osnove DSP-mikrokontrollera i sostave elektroprivoda [Digital signal processing system for a rotary transformer based on a DSP microcontroller and an electric drive]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 8, pp. 184–188.

9. STM32 Arm Cortex Microcontrollers. Available at: www.st.com (Date of appeal 16.12.2022).

10. Horovitz, P., Hill, W. *Iskusstvo skhemotekhniki. V 2 t., t. 1* [The Art of Electronics. In 2 vol., vol. 1]. Moscow: Izdatel'stvo Mir, 1986. 598 p.

11. Waijung Blockset. Available at: http://waijung.aimagin.com (Date of appeal 19.01.2023).

12. Polyuschenkov, I. Model-oriented Programming Technique in The Development of Electric Drive Control System. 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED), 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/IWED.2019.8664388.

УДК 621.313

**Виктор Николаевич Караулов**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, Россия, Иваново, e-mail: karaulov@em.ispu.ru

**Анатолий Феликсович Доржинкевич**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант кафедры электромеханики, Россия, Иваново, e-mail: dorzhinkevichanatol@gmail.com

# Параметрическая модель синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором в установившихся и переходных режимах

**Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Имеется значительный практический и научный интерес к синхронным реактивным двигателям с TLA-ротором. Сердечник TLA-ротора имеет поперечную шихтовку, внутренние пазы и сильно насыщенные участки. Конфигурация пазов ротора сложная и разнообразная. Актуальной является задача разработки параметрической модели синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором, предназначенной для расчета установившихся и переходных режимов работы двигателя.
**Материалы и методы.** Использована классическая параметрическая модель синхронного реактивного двигателя, основанная на теории двух реакций. Представленный метод расчета параметров модели синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором основан на результатах полевого расчета двух статических состояний магнитного поля. Расчеты установившихся режимов синхронного реактивного двигателя выполнены согласно инженерным формулам, которые получены из уравнения равновесия напряжений в фазе статора. Для расчета переходных режимов синхронного реактивного двигателя использованы уравнения Парка–Горева.
**Результаты.** Представлены полевые модели исследуемого синхронного реактивного двигателя при продольном и поперечном положениях ротора. Рассчитаны основные гармонические магнитного поля в зазоре и их зависимости от тока якоря. Приведены формулы для расчета индуктивных параметров обмотки якоря и рабочих характеристик синхронного реактивного двигателя. Приведены дифференциальные уравнения, используемые для расчета процессов в синхронном реактивном двигателе. С помощью параметрической модели рассчитаны рабочие характеристики синхронного реактивного двигателя, процесс частотного пуска, электромеханический процесс работы синхронного реактивного двигателя при несимметричном питании. Результаты расчетов сопоставлены с результатами полевого моделирования синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором в среде Ansys Maxwell.
**Выводы.** Классическая параметрическая модель синхронной машины, основанная на теории двух реакций, позволяет быстро и качественно анализировать установившиеся и переходные режимы работы синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором при различных условиях питания и механической нагрузки, в том числе анормальных.

**Ключевые слова:** синхронный реактивный двигатель, рабочие характеристики синхронного реактивного двигателя, TLA-ротор, параметрическая модель, установившиеся режимы работы двигателя, переходные режимы работы двигателя

**Viktor Nikolaevich Karaulov**
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electromechanics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: karaulov@em.ispu.ru

**Anatoly Feliksovich Dorzhinkevich**
Ivanovo State Power Engineering University, Master Degree Student of Electromechanics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: dorzhinkevichanatol@gmail.com

# Parametric model of synchronous reluctance motor with TLA-rotor in steady-state and transient modes

**Abstract**

**Background.** There is considerable practical and scientific interest in synchronous reaction motors (SynRM) with TLA rotor. The core of the TLA rotor has a transversal charge, internal slots, and highly saturated areas. The configuration of the rotor slots is complex and diverse. The task to develop a parametric model of the SynRM with a TLA-rotor designed for calculation of steady-state and transient modes of the motor is relevant.
**Materials and methods.** The classical parametric model of SynRM based on the theory of two reactions is used. The calculation method for the parameters of the SynRM model with TLA rotor is presented. The method uses the results of field calculation of two static states of the magnetic field. The steady-state conditions of SynRM are calculated according

© Караулов В.Н., Доржинкевич А.Ф., 2023
Вестник ИГЭУ, 2023, вып. 4, с. 46–53.

to the engineering formulas derived from the equation of equilibrium stresses in the stator phase. The Park-Gorev equations are used to calculate the transient modes of the SynRM.
**Results.** Field models of the SynRM under study at longitudinal and transverse rotor positions are presented. Main harmonics of magnetic field in the gap and their dependence on armature current are calculated. Formulas to calculate the inductive parameters of armature winding and performance characteristics of SynRM are given. Differential equations to calculate processes in SynRM are given. The parametric model is used to calculate performance characteristics of SynRM, frequency start process, electromechanical process of SynRM operation in case of asymmetric power supply. The calculation results are compared with the results of field simulation of SynRM with TLA rotor in the Ansys Maxwell environment.
**Conclusions.** The classical parametric model of the synchronous machine based on the theory of two reactions allows fast and high-quality analysis of steady-state and transient modes of operation of a synchronous reactive motor with TLA-rotor under various conditions of power supply and mechanical load, including abnormal ones.

**Key words:** synchronous reluctance motor, operating characteristics of synchronous reluctance motor, TLA-rotor, parametric model, steady-state operating modes of the motor, transient operating modes of the motor

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.4.046-053

**Введение.** Синхронные реактивные двигатели (СРД) с TLA-ротором получили большее распространение в системах автоматического управления [1, 2]. Достоинства СРД: низкая стоимость, высокий КПД, возможность точного регулирования скорости в широком диапазоне [3], небольшие пульсации вращающего момента [4]. В [5–7] показано, что энергоэффективность и энергоемкость СРД больше, чем у асинхронных двигателей. Конструктивные особенности СРД: сердечник TLA-ротора имеет поперечную шихтовку, внутренние пазы и сильно насыщенные участки. Конфигурация пазов в различных СРД сложная и разнообразная. В [8, 9] и во множестве других работ показано, что для управления СРД целесообразно использовать параметрическую модель двигателя, параметры которой должны рассчитываться с учетом насыщения стальных участков.

В [10] предложено рассчитывать параметры СРД по величине параметров асинхронного двигателя, у которого статор соответствует статору рассматриваемого СРД. При расчете параметров схемы замещения асинхронного двигателя использованы его каталожные данные. В [11] показано, что при построении систем управления реактивной электрической машиной необходимо учитывать изменение величины параметров обмотки якоря в процессе работы электропривода. Получен алгоритм идентификации параметров в стационарном режиме работы машины. В [12, 13] выполнен анализ и оптимизация конструкции ротора СРД на основе расчетов электромагнитного поля СРД в стационарном режиме работы машины. В [14] индуктивные параметры СРД рассчитаны исходя из расчетов электромагнитного поля.

Актуальной является задача разработки параметрической модели СРД с TLA-ротором, предназначенной для расчета установившихся и переходных режимов работы двигателя. Параметры модели СРД следует определять исходя из расчетов электромагнитного поля, что позволяет учитывать особенности конструкции машины и изменения насыщения магнитной цепи в зависимости от величины тока якоря.

При моделировании процессов в СРД с TLA-ротором может быть использована классическая модель СРД, основанная на теории двух реакций. Ниже представлен метод расчета параметров модели, основанный на результатах полевых расчетов двух статических состояний магнитного поля, описаны полевые модели исследуемого СРД при продольном и поперечном положениях ротора, рассчитаны основные гармонические магнитного поля в зазоре и их зависимости от тока якоря, а также приведены формулы для расчета индуктивных параметров обмотки якоря.

Для расчета установившихся режимов работы СРД с TLA-ротором использованы инженерные формулы, полученные на основе уравнения равновесия напряжений в фазе статора; расчеты переходных режимов выполнены на основе уравнений Парка–Горева. С помощью параметрической модели рассчитаны рабочие характеристики СРД, процесс частотного пуска, электромеханический процесс работы СРД при несимметричном питании. Результаты расчетов сопоставлены с результатами полевого моделирования СРД с TLA-ротором в среде Ansys Maxwell.

**Материалы и методы.** На рис. 1 представлена конструкция исследуемого СРД с TLA-ротором. Технические показатели двигателя: номинальная мощность 75 кВт, номинальное фазное напряжение 380 В, номинальный фазный ток 86 А, номинальная частота вращения 1500 об/мин, число фаз 3, частота питающего напряжения 50 Гц.

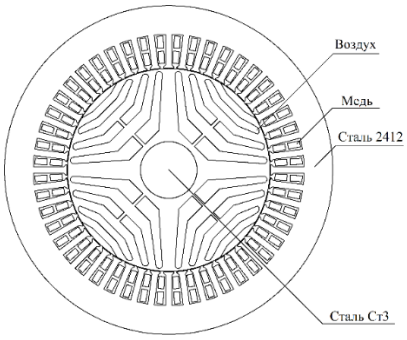



Рис. 1. Конструкция СРД с TLA-ротором

***Параметрическая модель СРД.*** Моделью установившегося синхронного режима работы СРД служит уравнение равновесия напряжений в фазе статора для действующих значений напряжений и токов на пространственно-временной комплексной плоскости:

$$\dot{U} = j\dot{I}_d x_{ad} + j\dot{I}_q x_{aq} + j\dot{I} x_s + \dot{I} r_1. \qquad (1)$$

Этому уравнению соответствует векторная диаграмма СРД, представленная на рис. 2.

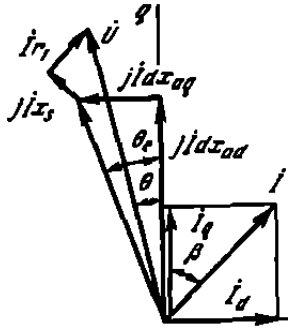



Рис. 2. Векторная диаграмма СРД

Моделью СРД в переходных режимах работы служит система дифференциальных уравнений Парка–Горева, записанных в осях $d$,$q$,0 (ось $d$ опережает ось $q$):

$$u_d = \frac{d\Psi_d}{dt} + i_d r_1 + \psi_q \omega;$$

$$u_q = \frac{d\Psi_q}{dt} + i_q r_1 - \psi_d \omega;$$

$$u_0 = i_0 r_1 + L_{\sigma 1}\frac{di_0}{dt}; \qquad (2)$$

$$M_{эм} = M_в + J\frac{d\Omega}{dt};$$

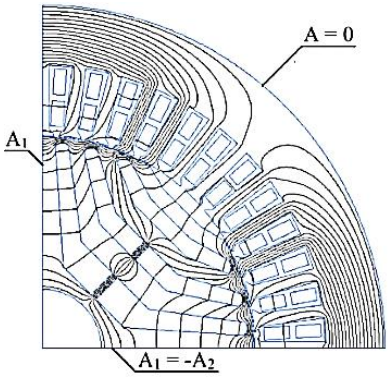
$$M_{эм} = 1{,}5 \cdot p(i_d \psi_q - i_q \psi_d);$$

$$\psi_d = \frac{x_d(I)}{\omega} I_d, \quad \psi_q = \frac{x_q(I)}{\omega} I_q.$$

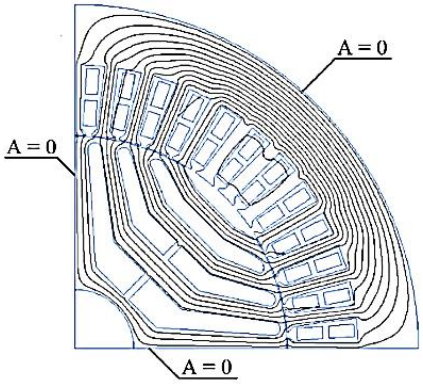
Сопротивления, используемые в уравнениях (1) и (2), являются параметрами СРД с TLA-ротором. Индуктивные сопротивления реакции якоря по продольной и поперечной осям $x_{ad}$ и $x_{aq}$ зависят от конструкции TLA-ротора, насыщения магнитной цепи и, соответственно, от величины тока якоря.

**Результаты.** ***Расчет параметров СРД с TLA-ротором.*** Для определения зависимостей $x_{ad} = f(I_d)$, $x_{aq} = f(I_q)$ выполнен полевой расчет двух статических состояний магнитного поля – при поперечном и продольном положениях ротора (рис. 3).

На рис. 3 показаны граничные условия для векторного магнитного потенциала и линии магнитной индукции. На внешнем диаметре якоря и для боковых сторон модели продольного поля выбрано граничное условие Дирихле; для боковых сторон модели поперечного поля – условие нечетной периодичности.



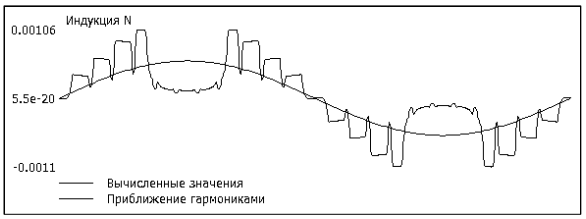

а)




б)

Рис. 3. Полевые модели СРД при двух положениях ротора: а – поперечное положение; б – продольное положение

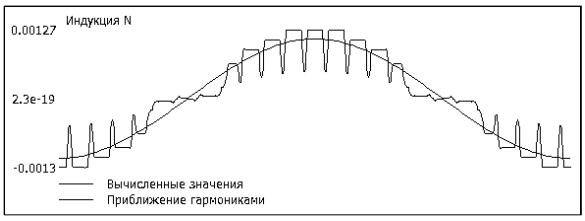
На рис. 4, 5 представлены результаты полевых расчетов: волна магнитной индукции на средней линии рабочего зазора и ее первая гармоническая при различном насыщении магнитной цепи.



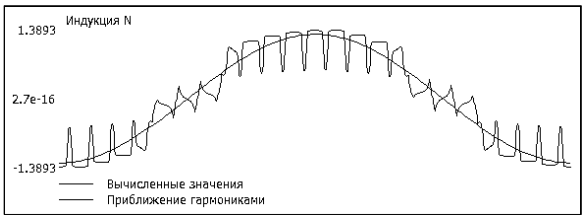

а)

б)

Рис. 4. Поперечная волна магнитной индукции в рабочем зазоре и ее первая гармоническая $B_{q1}$: а – при отсутствии насыщения магнитной цепи; б – при предельном насыщении магнитной цепи




а)




б)

Рис. 5. Продольная волна магнитной индукции в рабочем зазоре и ее первая гармоническая $B_{d1}$: а – при отсутствии насыщения магнитной цепи; б – при предельном насыщении магнитной цепи

На рис. 6 показаны зависимости амплитуды первой пространственной гармонической магнитной индукции в зазоре от тока фазы якоря $B_{d1} = f(I_d)$ и $B_{q1} = f(I_q)$.

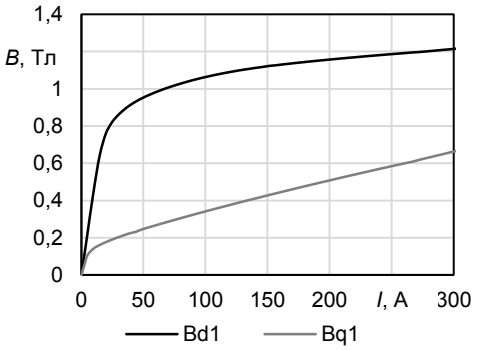



Рис. 6. Зависимости амплитуды первой пространственной гармонической магнитной индукции в зазоре от тока фазы якоря $B_{d1} = f(I_d)$ и $B_{q1} = f(I_q)$

Зависимости $B_{d1} = f(I_d)$ и $B_{q1} = f(I_q)$ использованы для расчета индуктивных сопротивлений реакции якоря. Вычислены:

- продольный и поперечный потоки якоря, Вб:

$$\Phi_{ad} = \frac{2}{\pi} B_{d1} l_\delta \tau; \quad \Phi_{aq} = \frac{2}{\pi} B_{q1} l_\delta \tau;$$

- продольная и поперечная ЭДС реакции якоря, В:

$$E_{ad} = \sqrt{2}\, \pi f_1 w k_{об} \Phi_{ad};$$

$$E_{aq} = \sqrt{2}\, \pi f_1 w k_{об} \Phi_{aq};$$

- индуктивные сопротивления реакции якоря, Ом:

$$x_{ad} = \frac{E_{ad}}{I_d}; \quad x_{aq} = \frac{E_{aq}}{I_q};$$

- индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря, Ом:

$$x_\sigma = 1{,}58 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \frac{l_\delta}{pq} (\lambda_П + \lambda_Л + \lambda_Д);$$

- синхронные индуктивные сопротивления якоря, Ом:

$x_d = x_{ad} + x_\sigma$; $x_q = x_{aq} + x_\sigma$.

В итоге получены зависимости сопротивлений от тока якоря:

$$x_d = f(I_d); \; x_q = f(I_q). \tag{3}$$

***Расчет рабочих характеристик.*** Для расчета рабочих характеристик СРД используется уравнения (1). В качестве независимой переменной выбирается угол Θ – угол между вектором питающего напряжения $U$ и поперечной осью $q$, показанный на рис. 2. Рабочие характеристики рассчитаны при значениях угла нагрузки Θ, изменяемом в диапазоне 0–90°.

Из векторной диаграммы, представленной на рис. 2, получены формулы для вычисления продольного и поперечного токов якоря, А:

$$I_d = \frac{U_ф \left( x_q(I) \cos(\Theta) - r_1 \sin(\Theta) \right)}{r_1^2 + x_d(I)\, x_q(I)};$$

$$I_q = \frac{U_ф \left( x_d(I) \sin(\Theta) + r_1 \cos(\Theta) \right)}{r_1^2 + x_d(I)\, x_q(I)}. \tag{4}$$

Токи, рассчитанные по формулам (4), используются для уточнения значений индуктивных сопротивлений с помощью зависимостей $x_d = f(I_d)$, $x_q = f(I_q)$. Вычисления токов и уточнение сопротивлений повторяются до тех пор, пока значения токов в текущей и предыдущей итерациях перестанут различаться.

Далее вычисляются:

- ток фазы якоря, А:

$$I = \sqrt{I_q^2 + I_d^2};$$

- реактивный момент, Н·м:

$$M = \frac{m p U_ф^2}{2\omega} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin(2 \cdot \Theta);$$

- потребляемая активная мощность, Вт:

$$P_1 = \frac{m U_ф^2 (x_d - x_q)}{2\,(r_1^2 + x_d\, x_q)} \sin(2 \cdot \Theta) + \frac{m\, U_ф^2\, r_1}{r_1^2 + x_d\, x_q};$$

- электромагнитный КПД, %:

$$\eta = \frac{P_{эм}}{P_1} \cdot 100;$$

- коэффициент мощности, о.е.:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{m\, U_ф\, I}. \tag{5}$$

На рис. 7–11 представлены рабочие характеристики исследуемого СРД с TLA-ротором, рассчитанные по формулам (4)–(5), и аналогичные характеристики, полученные в результате полевых расчетов в Ansys Maxwell.

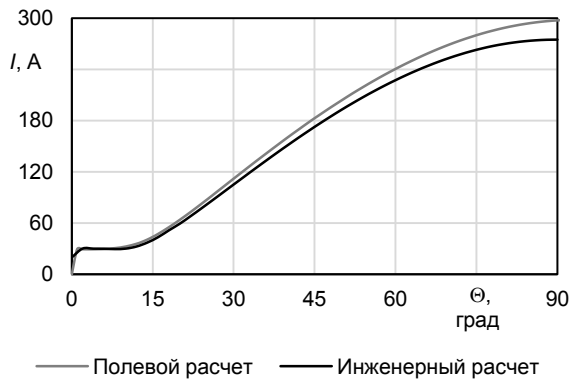



Рис. 7. Зависимость действующего тока якоря от угла нагрузки $I = f(\Theta)$

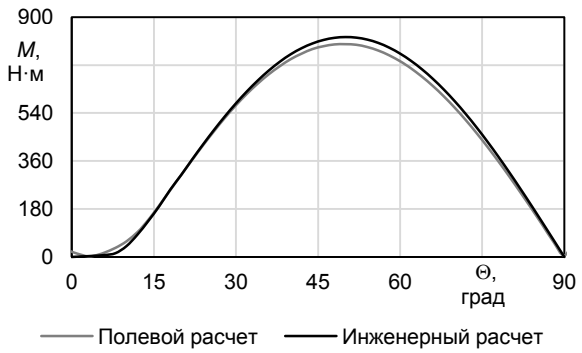



Рис. 8. Зависимость электромагнитного момента от угла нагрузки $M = f(\Theta)$

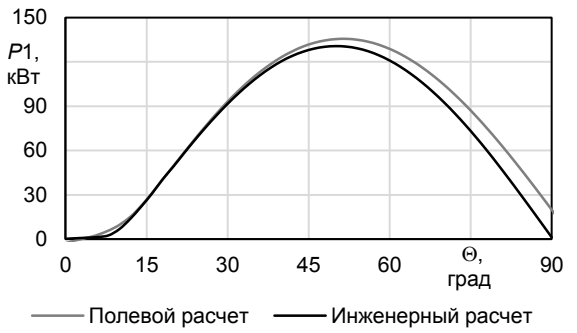



Рис. 9. Зависимость потребляемой активной мощности от угла нагрузки $P_1 = f(\Theta)$

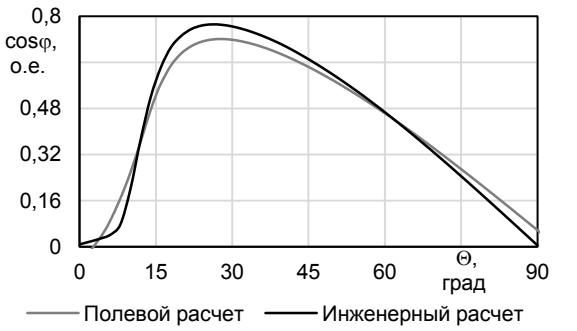



Рис. 10. Зависимость коэффициента мощности от угла нагрузки $\cos\varphi = f(\Theta)$

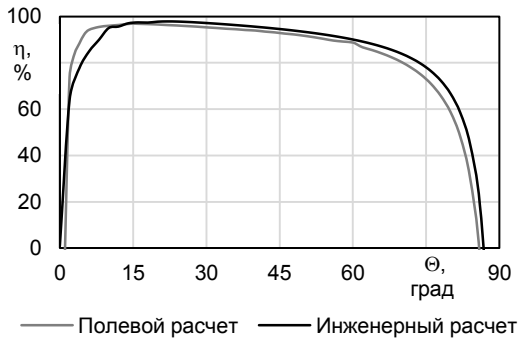



Рис. 11. Зависимость КПД от угла нагрузки $\eta = f(\Theta)$

***Расчет переходных процессов в СРД.*** Переходные процессы в СРД рассчитываются путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений (2). Используются зависимости мгновенных значений продольного и поперечного токов якоря от соответствующих потокосцеплений. Эти зависимости $i_d = f(\psi_d)$ и $i_q = f(\psi_q)$ показаны на рис. 12. Они определены на этапе расчета параметров СРД.

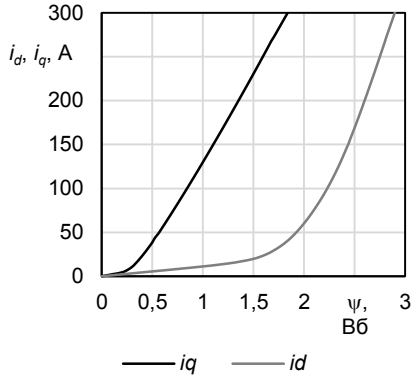



Рис. 12. Зависимости мгновенных токов от мгновенных потокосцеплений $i_d = f(\psi_d)$ и $i_q = f(\psi_q)$

Выполнен расчет электромеханического процесса частотного пуска СРД с TLA-ротором. Реализовано скалярное управление пусковым процессом: амплитуда и частота питающего напряжения линейно возрастают до номинальных значений в течение одной секунды и далее не изменяются. В момент времени $t$ = 1,5 с происходит «наброс» номинальной нагрузки $M_н$ = 478 Н·м. Величина тормозного момента зависит от угловой скорости ротора согласно характеру вентиляторной нагрузки

$$M_В = M_н \left(\frac{\omega}{\omega_н}\right)^2.$$

Потери в стали и механические потери не учитывались. Результаты расчета параметрической модели СРД (инженерный расчет) сопоставлены с аналогичными результатами полевых расчетов. На рис. 13 показано изменение частоты вращения ротора в ходе процесса частотного пуска СРД; на рис. 14 – изменение электромагнитного момента; на рис. 15 – изменение тока в фазе якоря.

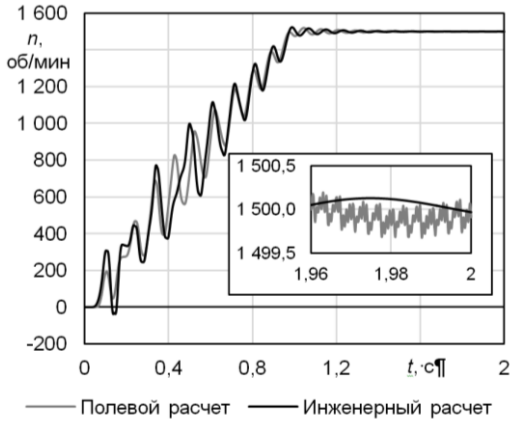



Рис. 13. Частота вращения ротора в процессе частотного пуска

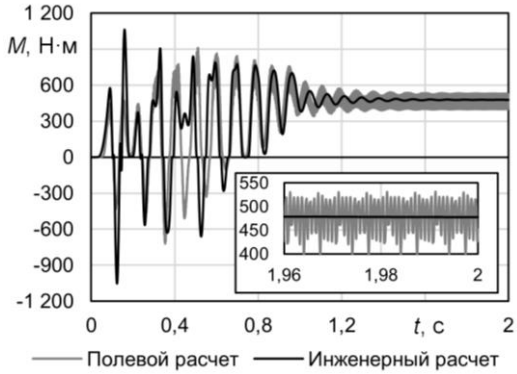



Рис. 14. Электромагнитный момент в процессе частотного пуска

Энергетические показатели машины рассчитаны после завершения процесса пуска по следующим формулам:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\frac{1}{T}\int_{t_к - T}^{t_к} (M\omega)dt}{\frac{1}{T}\int_{t_к - T}^{t_к} (u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C)\, dt};$$

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{\frac{1}{T}\int_{t_к - T}^{t_к} (u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C)\, dt}{U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C}.$$

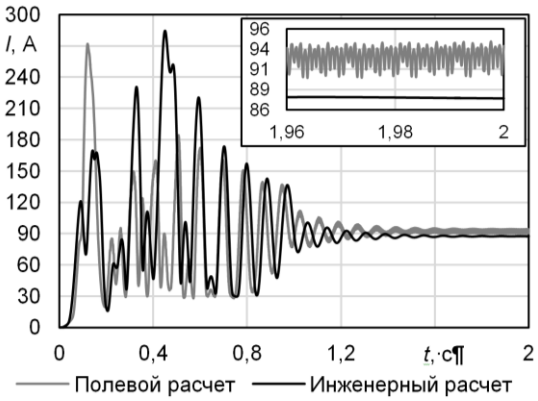



Рис. 15. Действующий ток якоря в процессе частотного пуска

Таблица 1. **Энергетические показатели в установившемся режиме работы**

| Энергетическое показатели | Инженерный расчет | Полевой расчет |
|---|---|---|
| η, о.е. | 0,977 | 0,971 |
| cosφ, о.е. | 0,771 | 0,732 |

***Расчет несимметричных режимов работы СРД.*** Переходные и установившиеся процессы в несимметричных режимах работы СРД рассчитываются путем численного решения системы уравнений (2).

На рис. 16–18 и в табл. 2 представлены результаты расчета установившегося электромеханического процесса работы СРД с TLA-ротором при несимметричном питании: в одной из фаз величина амплитуды и фазы напряжения изменена на 5 %. Результаты расчета параметрической модели СРД (инженерный расчет) сопоставлены с аналогичными результатами полевых расчетов.

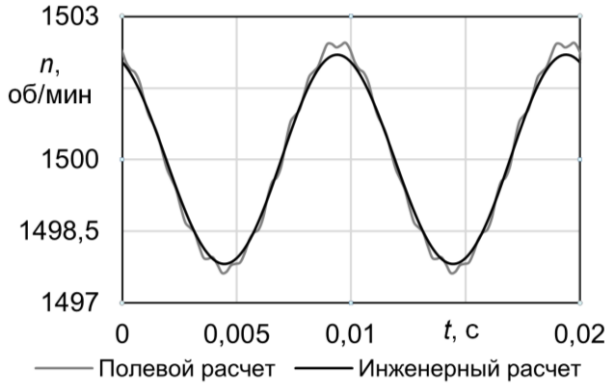



Рис. 16. Частота вращения ротора при несимметричном питающем напряжении

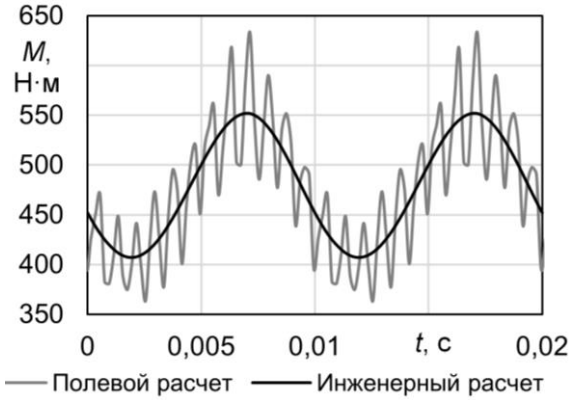



Рис. 17. Электромагнитный момент при несимметричном питающем напряжении

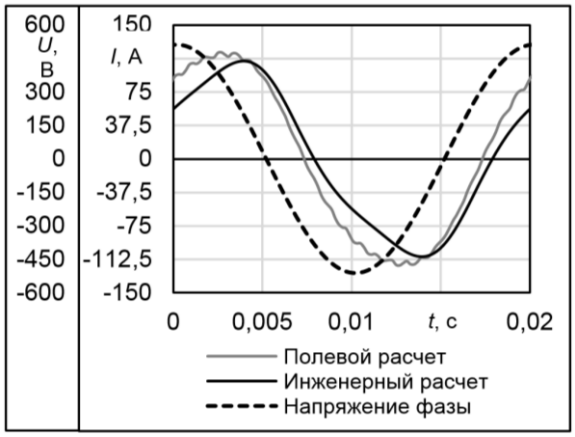



Рис. 18. Напряжение и ток в фазе статора при несимметричном питающем напряжении

Таблица 2. **Энергетические показатели в установившемся режиме работы при несимметричном питании**

| Энергетическое показатели | Инженерный расчет | Полевой расчет |
|---|---|---|
| η, о.е. | 0,974 | 0,964 |
| cosφ, о.е. | 0,74 | 0,728 |

**Выводы.** Классическая параметрическая модель синхронной машины, основанная на теории двух реакций, а также метод расчета параметров модели, основанный на результатах полевых расчетов двух статических состояний магнитного поля, позволяет быстро и качественно анализировать установившиеся и переходные режимы работы синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором при различных условиях питания и механической нагрузки, в том числе анормальных.

### Список литературы

1. **Шульга Р.Н.** Синхронный реактивный двигатель в современном электроприводе // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2023. – № 1. – С. 44–55. – EDN JMGRWE.

2. **Тихомиров О.И.** Синхронные реактивные электродвигатели для создания энергоэффективных решений класса IE5 // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 1. – С. 42–44. DOI: 10.25728/avtprom.2022.01.09. – EDN UNYBKL.

3. **Митрофанов И.И.** Оптимальное по точности управление угловой скоростью синхронного реактивного двигателя // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 11-1. – С. 186–190. – EDN PYURRB.

4. **Птах Г.К.** Сравнительная оценка электрических двигателей переменного тока асинхронного и синхронного типов с целью применения их в гребных электроустановках ледоколов большой мощности // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 5. – С. 24–30. – DOI: 10.17213/0136-3360-2019-5-24-30. – EDN ISPZZZ.

5. **Zakharov A.V., Malafeev S.I., Dudulin A.L.** Synchronous reluctance motor: Design and experimental research // 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), Novocherkassk, Russia. – 2018. – P. 1–4. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571500.

6. **Synchronous** Reluctance Machines: A Comprehensive Review and Technology Comparison / M. Murataliyev, M. Degano, M. Di Nardo, N. Bianchi, C. Gerada // Proceedings of the IEEE. – 2022. – Vol. 110. – P. 1–18. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3145662.

7. **Сравнение** энергопотребления асинхронного и синхронного реактивного двигателей в насосном приложении / А.С. Парамонов, В.М. Казакбаев, С.Х. Ошурбеков, В.А. Прахт // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: материалы Междунар. науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых, посвященной памяти проф. Данилова Н.И. (1945–2015) – Даниловских чтений, Екатеринбург, 09–13 декабря 2019 года. – Екатеринбург, 2019. – С. 300–303.

8. **Nonlinear** magnetic field vector control with time-varying parameters for high-power electrically excited synchronous motor / Y. Han, X. Wu, G. He, et al. // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2020. – P. 11053–11063.

9. **Jung-sik Choi, Jae-sub Ko, Dong-hwa Chung.** Efficiency Optimization Control of SynRM Drive // 2006 SICE-ICASE International Joint Conference. – Busan, Korea (South), 2006. – P. 690–695. DOI: 10.1109/SICE.2006.315625.

10. **Казакбаев В.М., Прахт В.А., Дмитриевский В.А.** Расчет рабочих характеристик синхронного реактивного двигателя в приводе насоса // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий (АПЭЭТ-2014): материалы III Междунар. конф., Екатеринбург, 17–20 марта 2014 года / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. – С. 238–243. – EDN VULCJB.

11. **Самосейко В.Ф., Шарашкин С.В., Гельвер Ф.А.** Идентификация параметров реактивного электродвигателя с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9, № 3. – С. 637–644. – DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-637-644. – EDN YTXYGX.

12. **Synchronous** Reluctance Motor: Design, Optimization and Validation / M. Tursini, M. Villani, G. Fabri, et al. // 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)/ – 2018. – P. 1297–1302. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445304.

13. **Barta J., Ondrusek C**. Rotor design and optimization of synchronous reluctance machine // MM Science Journal. – 2015. – P. 555–559. DOI: 10.17973/MMSJ.2015_03_201504.

14. **Суворкова Е.Е., Дементьев Ю.Н., Бурулько Л.К.** Расчет магнитных полей и индуктивных параметров синхронных реактивных двигателей // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 6-1. – С. 112–116.

## References


1. Shul'ga, R.N. Sinkhronnyy reaktivnyy dvigatel' v sovremennom elektroprivode [Synchronous reluctance engine in a private electric drive]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2023, no. 1, pp. 44–55. EDN JMGRWE.

2. Tikhomirov, O.I. Sinkhronnye reaktivnye elektrodvigateli dlya sozdaniya energoeffektivnykh resheniy klassa IE5 [Synchronous reluctance motors for creating energy-efficient solutions of class IE5]. *Automation in industry*, 2022, no. 1, pp. 42–44. DOI: 10.25728/avtprom.2022.01.09. EDN UNYBKL.

3. Mitrofanov, I.I. Optimal'noe po tochnosti upravlenie uglovoy skorost'yu sinkhronnogo reaktivnogo dvigatelya [Optimal control of the angular velocity of a synchronous jet engine in terms of accuracy]. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 2012, no. 11-1, pp. 186–190. EDN PYURRB.

4. Ptakh, G.K. Sravnitel'naya otsenka elektricheskikh dvigateley peremennogo toka asinkhronnogo i sinkhronnogo tipov s tsel'yu primeneniya ikh v grebnykh elektroustanovkakh ledokolov bol'shoy moshchnosti [Comparative evaluation of alternating current electric motors of asynchronous and synchronous types for the purpose of their application in rowing electrical installations of icebreakers of high power]. *Izvestiya of higher educational institutions. Electromechanics*, 2019, vol. 62, no. 5, pp. 24–30. DOI: 10.17213/0136-3360-2019-5-24-30. EDN ISPZZZ.

5. Zakharov, A.V., Malafeev, S.I., Dudulin, A.L. Synchronous reluctance motor: Design and experimental research. 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). Novocherkassk, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571500.

6. Murataliyev, M., Degano, M., Di Nardo, M., Bianchi, N., Gerada, C. Synchronous Reluctance Machines: A Comprehensive Review and Technology Comparison. Proceedings of the IEEE, 2022, vol. 110, pp. 1–18. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3145662.

7. Paramonov, A.S., Kazakbaev, V.M., Oshurbekov, S.Kh., Prakht, V.A. Sravnenie energopotrebleniya asinkhronnogo i sinkhronnogo reaktivnogo dvigateley v nasosnom prilozhenii [Comparison of power consumption of asynchronous and synchronous jet engines in a pumping application]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, posvyashchennoy pamyati prof. Danilova N.I. (1945–2015) «Energo- i resursosberezhenie. Energoobespechenie. Netraditsionnye i vozobnovlyaemye istochniki energii. Atomnaya energetika» (Danilovskikh chteniy), Ekaterinburg, 09–13 dekabrya 2019 goda* [Materials of the International Scientific and Practical Conference of Students, postgraduates and Young Scientists dedicated to the memory of Prof. Danilova N.I. (1945–2015) “Energy and resource conservation. Energy supply. Unconventional and renewable energy sources. Nuclear power engineering” (Danilovsky Readings), Yekaterinburg, December 09–13, 2019]. Ekaterinburg, 2019, pp. 300–303.

8. Han, Y., Wu, X., He, G., Hu, Y., Ni, K. Nonlinear magnetic field vector control with time-varying parameters for high-power electrically excited synchronous motor. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, pp. 11053–11063.

9. Choi J.-s., Ko J.-s., Chung D.-h. Efficiency Optimization Control of SynRM Drive. 2006 SICE-ICASE International Joint Conference. Busan, Korea (South), 2006, pp. 690–695. DOI: 10.1109/SICE.2006.315625.

10. Kazakbaev, V.M., Prakht, V.A., Dmitrievskiy, V.A. Raschet rabochikh kharakteristik sinkhronnogo reaktivnogo dvigatelya v privode nasosa [Calculation of the performance characteristics of a synchronous jet engine in a pump drive]. *Materialy III Mezhdunarodnoy konferentsii «Aktual'nye problemy energosberegayushchikh elektrotekhnologiy» (APEET-2014), Ekaterinburg, 17–20 marta 2014 goda* [Proceedings of the III International Conference “Actual problems of energy-saving electrical technologies” (APEET-2014), Yekaterinburg, March 17–20, 2014]. Ekaterinburg, 2014, pp. 238–243. EDN VULCJB.

11. Samoseyko, V.F., Sharashkin, S.V., Gel'ver, F.A. Identifikatsiya parametrov reaktivnogo elektrodvigatelya s anizotropnoy magnitnoy provodimost'yu rotora [Identification of parameters of a reactive electric motor with anisotropic magnetic conductivity of the rotor]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 637–644. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-637-644. EDN YTXYGX.

12. Tursini, M., Villani, M., Fabri, G., Credo, A., Parasiliti, F., Abdelli, A. Synchronous Reluctance Motor: Design, Optimization and Validation. 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2018, pp. 1297–1302. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445304.

13. Barta, J., Ondrusek, C. Rotor design and optimization of synchronous reluctance machine. MM Science Journal, 2015, pp. 555–559. DOI: 10.17973/MMSJ.2015_03_201504.

14. Suvorkova, E.E., Dement'ev, Yu.N., Burul'ko, L.K. Raschet magnitnykh poley i induktivnykh parametrov sinkhronnykh reaktivnykh dvigateley [Calculation of magnetic fields and inductive parameters of synchronous jet engines]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2016, no. 6-1, pp. 112–116.

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5.013

**Алексей Михайлович Аббясов**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, старший преподаватель кафедры электроники и микропроцессорных систем, Россия, Иваново, e-mail: alexx.bit@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 робастной системы управления транспортированием длинномерного материала на основе грамианного метода[1]

**Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Системы управления транспортированием материала входят в состав большого числа автоматизированных технологических комплексов непрерывно-поточного производства в разнообразных отраслях промышленности. Для согласованной работы агрегированных машин требуется обеспечить заданное качество управления натяжением транспортируемого материала в условиях исходной неопределенности и возможных вариаций внутренних параметров САУ, прежде всего инерции вращения измерительного ролика и изменений геометрии зоны деформации материала, т. е. обеспечить существенное повышение робастных свойств.
**Материалы и методы.** Предлагаемая методика синтеза робастных систем управления с динамическими (полиномиальными) регуляторами «входа–выхода» основана на итерационном подходе, на каждом шаге которого целенаправленно изменяются сингулярные числа грамианов управляемости и/или наблюдаемости, формируется предрегулятор, преобразующий структуру расчетной модели объекта в направлении повышения управляемости и/или наблюдаемости.
**Результаты.** Предложена методика синтеза робастной системы управления транспортированием длинномерного материала на основе грамианного метода. Использование улучшенной модели объекта позволяет сформировать основной полиномиальный регулятор «входа–выхода», способный обеспечивать и сохранять желаемые показатели качества и быстродействия в заданных пределах изменения параметров объекта и регулятора, в том числе при редуцировании корректирующего предрегулятора.
**Выводы.** Полученные результаты позволяют наглядно показать высокую эффективность использования грамианного метода для синтеза систем управления с низкой чувствительностью к вариациям как параметров объекта управления, так и собственных параметров регулятора.

**Ключевые слова:** двухканальная САУ, транспортирование материала, грамианный метод, полиномиальный регулятор, робастная система управления

[1] Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ №075-03-2023-025 (1/23).
The study is conducted within the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 075-03-2023-025 (1/23).

© Аббясов А.М., Тарарыкин С.В., 2023
Вестник ИГЭУ, 2023, вып. 4, с. 54–62.

**Alexey Mikhailovich Abbyasov**
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Senior Lecturer of Electronics and Microprocessor Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: alexx.bit@mail.ru

**Sergey Vyacheslavovich Tararykin**
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Electronics and Microprocessor Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tsv@ispu.ru

# Synthesis of robust control system for transportation of long-length material based on Gramian method

**Abstract**

**Background.** Material transportation control systems are part of many automated technological complexes for continuous production in various industries. For the coordinated operation of the aggregated machines, it is required to ensure a given quality of control of the tension of material transportation under conditions of initial uncertainty and possible variations in the internal parameters of the ACS, primarily the inertia of rotation of the measuring roller and changes in the geometry of the deformation zone of the material, i.e., it is required to provide a significant increase in robust properties.
**Materials and methods.** A method for the synthesis of robust control systems with dynamic (polynomial) input-output regulators is proposed. It is based on an iterative approach, at each step of which the singular numbers of gramians of controllability and/or observability are purposefully changed, a preregulator is formed.It transforms the structure of the computational model of the object in the direction of increasing controllability and/or observability.
**Results.** The authors have proposed a method for the synthesis of a robust control system for the transportation of long-length material based on the Gramian method. The use of an improved model of the object makes it possible to form a basic polynomial input-output controller capable of providing and maintaining the desired quality and performance indicators within the specified limits of changing the parameters of the object and the controller, including when reducing the corrective pre-regulator.
**Conclusions.** The results obtained allow us to demonstrate the high efficiency of a Gramian method for the synthesis of control systems with low sensitivity to variations in both the parameters of the control object and the controller own parameters.

**Key words:** two-channel ACS, material transportation, Gramian method, polynomial regulator, robust control system

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.4.054-062

**Введение.** Системы управления транспортированием длинномерных материалов в процессах их технологической обработки находят широкое применение в составе многомашинного агрегатированного оборудования (поточных линий) в химической, бумагоделательной, текстильной, металлургической и других отраслях промышленности [1–6]. Они обеспечивают согласованную работу (синхронизацию) технологических машин в различных режимах обработки материала, а также необходимое силовое воздействие на полотно для управления физико-механическими параметрами выпускаемой продукции (толщины пленки или металлической полосы, диаметра волокна, удельного веса бумаги, плотности ткани и т.п.) [1, 3–7].

Базовыми элементами таких многомашинных систем являются двухканальные системы автоматического управления транспортированием материала (САУ ТМ) (рис. 1), объединение которых в единую поточную линию обеспечивает выполнение требуемых технологических функций, возложенных на агрегатированное оборудование [2, 6, 8].

Двухканальные САУ ТМ строятся обычно по принципу «ведущий – ведомый». При этом каждый канал содержит индивидуальный электропривод (ЭП) постоянного или переменного тока, приводящий в движение рабочий орган (РО) машины и кинематической передачи (КП) (индексы 1 и 2 на рис. 1 означают принадлежность элементов соответственно к ведущему и ведомому каналам).

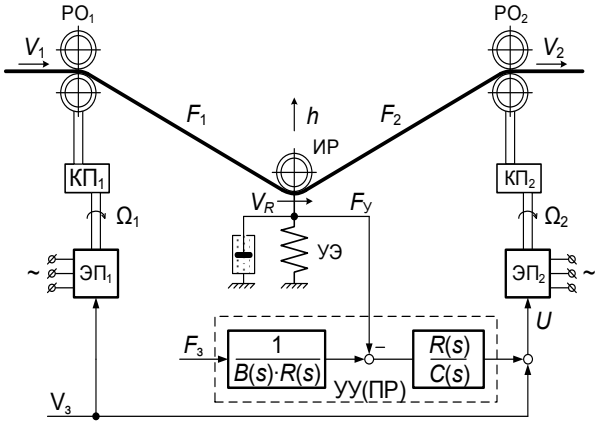



Рис. 1. Функциональная схема двухканальной САУ ТМ

Управляемая синхронизация машин осуществляется формированием и отработкой единого сигнала задания скорости $V_3$ на оба электропривода, а также корректирующего сигнала по натяжению $F_3$ транспортируемого материала (ТМ) на управляющее устройство (УУ)

ведомого ЭП. При этом контроль натяжения ТМ осуществляется по перемещению направляющего измерительного ролика (ИР), связанного с упругим элементом (УЭ), сила упругости которого $F_У$ уравновешивает результирующую сил натяжения $F_1$, $F_2$ в ветвях транспортируемого полотна с учетом геометрии зоны деформации материала. Символами $V_1$, $V_2$ и $V_R$ обозначены соответственно линейные скорости ТМ в точках его соприкосновения с $РО_1$, $РО_2$ и ИР (при отсутствии проскальзывания), а символом $h$ – линейное перемещение ИР.

Для согласованной работы агрегированных машин требуется обеспечить заданное качество управления натяжением ТМ в условиях исходной неопределенности и возможных вариаций внутренних параметров САУ, прежде всего инерции вращения ИР и изменений геометрии зоны деформации материала.

**Математическое описание и анализ объекта управления.** Структурная схема объекта управления (ОУ) в составе САУ ТМ, выполненная в соответствии с [9], представлена на рис. 2, где $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$ – деформации материала; $K_{P1}$, $K_{P2}$ – коэффициенты передачи каналов ЭП; $K_{V1} = 1/V_1$, $K_{V2} = 1/V_2$ и $T_1 = L_1/V_1$, $T_2 = L_2/V_2$; $L_1$, $L_2$ – длины зон деформации; $E$ – модуль упругости материала, приведенный к его ширине; $J_R$, $R$ – момент инерции и радиус ИР; $K_G$ – коэффициент геометрии; $K_T$, $K_R$ – коэффициенты трения поступательного движения и вращения ИР; $K_У$ – коэффициент упругости УЭ.

В силу высокого быстродействия используемых ЭП они принимаются безынерционными, а высокая собственная частота хорошо демпфированных колебаний ИР дает основание представить его динамику апериодическим звеном первого порядка.

Соответствующее векторно-матричное описание ОУ принимает следующий вид: вектор координат состояния $x = \begin{bmatrix} V_R & \varepsilon_1 & \varepsilon_2 & h \end{bmatrix}^T$, матрицы динамики, входа и выхода:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\dfrac{K_R R}{J_R} & -\dfrac{R^2 E}{J_R} & \dfrac{R^2 E}{J_R} & 0 \\ \dfrac{K_{V1}}{T_1} & -\dfrac{K_{V1} K_G^2 E}{T_1 K_T} - \dfrac{1}{T_1} & -\dfrac{K_{V1} K_G^2 E}{T_1 K_T} & \dfrac{K_{V1} K_G K_У}{T_1 K_T} \\ -\dfrac{K_{V2}}{T_2} & -\dfrac{K_{V2} K_G^2 E}{T_2 K_T} + \dfrac{1}{T_2} & -\dfrac{K_{V2} K_G^2 E}{T_2 K_T} - \dfrac{1}{T_2} & \dfrac{K_{V2} K_G K_У}{T_2 K_T} \\ 0 & \dfrac{K_G E}{K_T} & \dfrac{K_G E}{K_T} & -\dfrac{K_У}{K_T} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dfrac{K_{P2} K_{V2}}{T_2} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & K_У \end{bmatrix}.$$

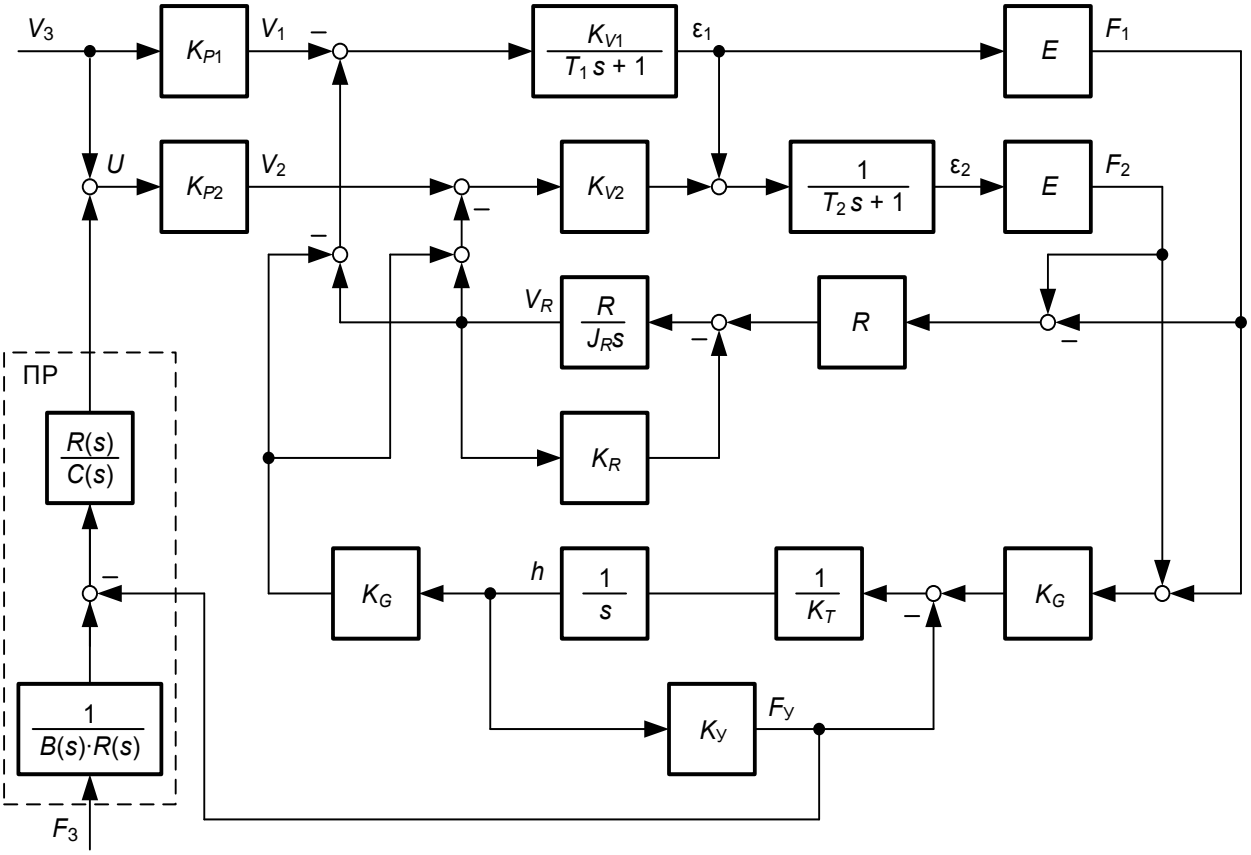



Рис. 2. Структурная схема двухканальной САУ ТМ

Примем для конкретности числовые значения параметров типового ОУ, соответствующие зонам деформации пленочных материалов поточной линии ПЭТФ-2400: $K_{P1}$ = $K_{P2}$ = 16,5; $L_1$ = 1,8 м; $L_2$ = 2,2 м; $V_1$ = 2 м/с; $E$ = 5000 Н; $R$ = 0,065 м; $K_T$ = 2000 Н·с/м; $K_R$ = 60 Н·с; $K_Y$ = 8000 Н/м; $J_R$ = 0,5 ± 0,15 кг·м²; $K_G$ = 1,2 ± 0,15 (параметры $J_R$ и $K_G$ в силу особенностей ОУ имеют интервальный характер). В результате получаем следующие номинальные числовые значения матриц:

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix} -7{,}8 & -42{,}25 & 42{,}25 & 0 \\ 0{,}56 & -3{,}11 & -2 & 2{,}67 \\ -0{,}45 & -0{,}73 & -2{,}55 & 2{,}18 \\ 0 & 3 & 3 & -4 \end{bmatrix};\ \mathbf{B}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 7{,}5 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 8000 \end{bmatrix},$$

и выражение передаточной функции (ПФ) от управляющего воздействия $U$ к выходу $F_y$:

$$H_0=\frac{B(s)}{A(s)}=\frac{1{,}8\cdot 10^5 s^2+1{,}6\cdot 10^6 s+10^7}{s^4+17{,}5s^4+132{,}5s^3+463{,}2s+116{,}9}.$$

Соответствующее распределение нулей и полюсов ПФ объекта, т.е. корней полиномов ее числителя $B(s)$ и знаменателя $A(s)$, приведены на рис. 3,а.

Количественные оценки степени управляемости и наблюдаемости ОУ могут быть выполнены, согласно [10], с использованием норм матриц $\mathbf{P}_U=\bar{\mathbf{U}}\cdot\mathbf{U}^{-1}$ и $\mathbf{P}_V=\tilde{\mathbf{V}}\cdot\mathbf{U}^{-1}$, где $\bar{\mathbf{U}}$ и $\mathbf{U}$ – матрицы управляемости в канонической форме управляемости и в реальных координатах; $\tilde{\mathbf{V}}$ и $\mathbf{V}$ – матрицы наблюдаемости в канонической форме наблюдаемости и в реальных координатах. В данном случае нормы этих матриц $\|\mathbf{P}_U\|_1$ и $\|\mathbf{P}_V\|_1$, согласованных с объектом соответственно по входу и выходу, принимают значения, существенно отличающиеся от единичных: $\|\mathbf{P}_U\|_1=5{,}18$; $\|\mathbf{P}_V\|_1=261{,}91$.

Анализ приведенного математического описания ОУ показывает, что он имеет достаточно высокий порядок, характеризуется наличием сложных взаимосвязей координат состояния и неблагоприятным взаимным расположением нулей и полюсов, приводящим к существенному снижению степени наблюдаемости.

Это исключает возможность достижения высокого качества управления при использовании типовых регуляторов пониженного порядка или каскадных регуляторов с подчиненным регулированием координат и указывает на целесообразность применения управления по состоянию.

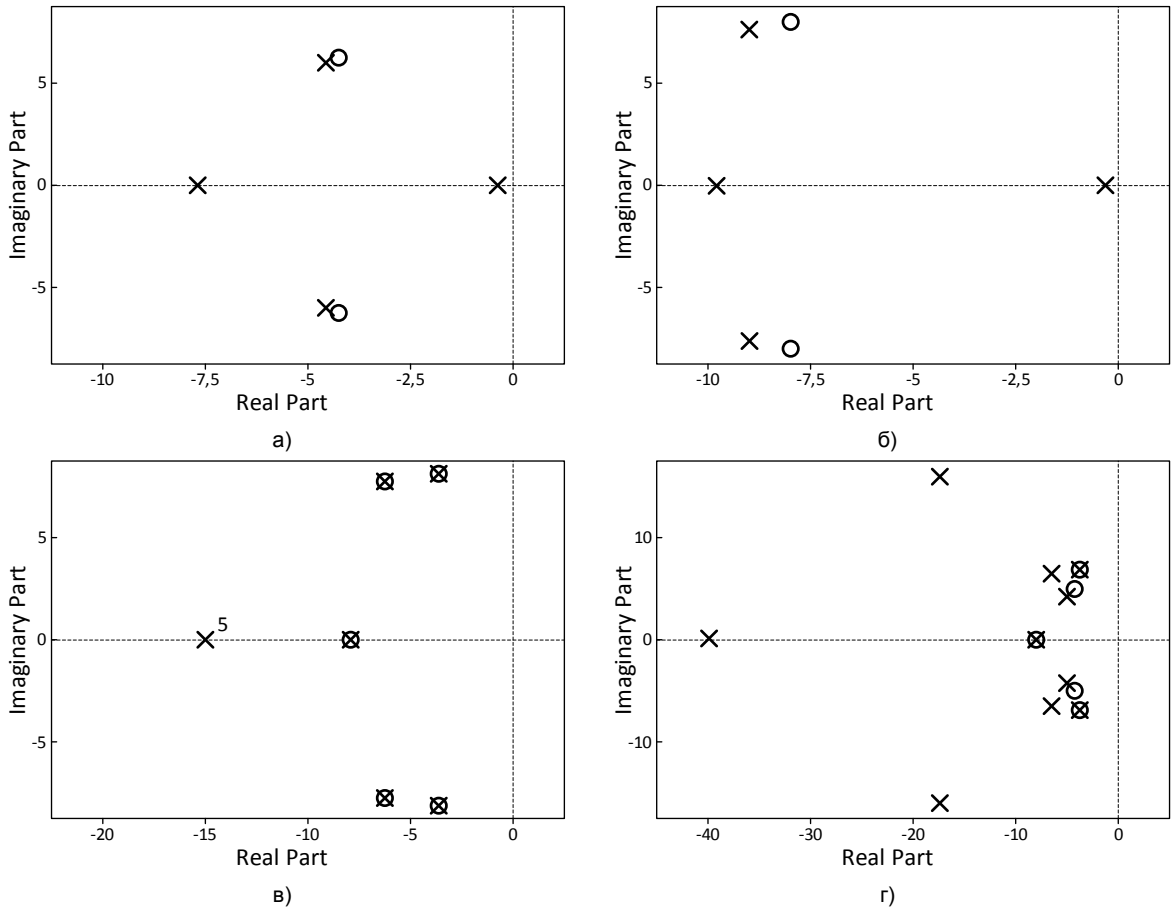



Рис. 3. Распределение нулей (о) и полюсов (х): а – исходного ОУ; б – скорректированного ОУ; в – синтезированной САУ ТМ; г – САУ ТМ после отключения предрегулятора

Однако значительные трудности измерения всех составляющих полного вектора состояния объекта приводят к необходимости замены безынерционных и интегрирующих регуляторов состояния (РС) полного порядка [11, 12] в составе САУ ТМ на динамические регуляторы «входа–выхода» с дробно-рациональным представлением их ПФ полиномами повышенного порядка, получивших название полиномиальных регуляторов (ПР) [13–15].

Возможные вариации ряда внутренних параметров заданного ОУ в широких пределах существенно усложняют управление и требуют обеспечения робастных свойств САУ ТМ с динамическими ПР «входа–выхода».

**Синтез робастной САУ ТМ на основе грамианного метода.** Традиционно синтез САУ с динамическими ПР проводят методом полиномиального модального управления [13–15] при номинальных значениях параметров ОУ путем решения уравнения синтеза вида

$$A(s)\,C(s) + B(s)\,R(s) = D(s),$$

где $R(s)$ и $C(s)$ – полиномы числителя и знаменателя ПФ регулятора; $D(s)$ – желаемый характеристический полином (ХП) ПФ синтезируемой системы, определяющий требуемое быстродействие и качество управления.

Однако при определенных отклонениях внутренних параметров ОУ от расчетных значений в условиях низких степеней его управляемости и наблюдаемости может происходить существенное ухудшение качества управления и даже потеря устойчивости системы в реальных условиях ее эксплуатации.

Так, для принятых номинальных параметров ОУ и при заданном выражении ХП синтезируемой САУ в виде полинома Ньютона $D(s) = (s + 15)^4$ решением уравнения синтеза получаем следующие выражения полиномов ПР минимального порядка:

$$R(s) = 0{,}18s^3 + 3{,}01s^2 + 15{,}21s + 19{,}61;$$

$$C(s) = s^3 + 87{,}54s^2 - 2857{,}62s - 21707{,}28.$$

Такой регулятор оказывается неминимально-фазовым динамическим звеном, является трудно реализуемым и значительно снижает параметрическую грубость системы управления, сформированной на его основе. Соответствующие переходные характеристики синтезированной САУ ТМ, полученные методом цифрового моделирования при исходных параметрах ОУ и их возможных отклонениях от расчетных значений, приведены на рис. 4,а. Они свидетельствуют о высокой чувствительности системы к параметрическим возмущениям и необходимости значительного улучшения ее робастных свойств.

Для достижения этой цели наиболее эффективным является использование грамианного метода синтеза [10], разработанного применительно к системам на базе регуляторов состояния.

Руководствуясь аналогиями с [10], предлагается использовать итерационный метод синтеза робастных САУ с динамическими ПР «входа–выхода», на каждом шаге которого целенаправленно изменяются сингулярные числа грамианов управляемости или наблюдаемости, формируется предрегулятор, преобразующий структуру расчетной модели объекта в направлении повышения управляемости и наблюдаемости, рассчитываются параметры основного регулятора и выполняется оценка робастных свойств синтезированной системы в заданных интервалах изменения внутренних параметров.

В основу метода закладывается математический аппарат грамианов управляемости $\mathbf{G}_\mathrm{C}$ и наблюдаемости $\mathbf{G}_\mathrm{O}$ [16–19], определяемых выражениями:

$$\mathbf{G}_\mathrm{C} = \int_0^\infty e^{\mathbf{A}t}\mathbf{B}\mathbf{B}^\mathrm{T}e^{\mathbf{A}^\mathrm{T}t}dt;\quad \mathbf{G}_\mathrm{O} = \int_0^\infty e^{\mathbf{A}^\mathrm{T}t}\mathbf{C}^\mathrm{T}\mathbf{C}e^{\mathbf{A}^\mathrm{T}t}dt,$$

где $t$ – время.

Применяются процедуры сингулярного разложения, приводящие грамианы к следующему виду:

$$\mathbf{G}_\mathrm{C} = \mathbf{U}_\mathrm{C}\boldsymbol{\Sigma}_\mathrm{C}\mathbf{U}_\mathrm{C}^\mathrm{T};\quad \mathbf{G}_\mathrm{O} = \mathbf{U}_\mathrm{O}\boldsymbol{\Sigma}_\mathrm{O}\mathbf{U}_\mathrm{O}^\mathrm{T},$$

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

Относительно малые значения сингулярных чисел также являются признаками плохой управляемости или плохой наблюдаемости координат состояния объекта.

Сущность метода заключается в том, что для исходной матричной модели объекта принудительно увеличивают малые значения сингулярных чисел грамиана управляемости и грамиана наблюдаемости:

$$\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_\mathrm{C} = \boldsymbol{\Sigma}_\mathrm{C} + \Delta\boldsymbol{\Sigma}_\mathrm{C};\quad \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_\mathrm{O} = \boldsymbol{\Sigma}_\mathrm{O} + \Delta\boldsymbol{\Sigma}_\mathrm{O}.$$

Затем определяют матрицы $\hat{\mathbf{A}}, \hat{\mathbf{U}}_\mathrm{C}$ и $\hat{\mathbf{V}}_\mathrm{O}$ модели объекта, переведенной в новую систему координат путем преобразования подобия с использованием соотношений:

$$\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T};\ \hat{\mathbf{G}}_\mathrm{C} = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{G}_\mathrm{C}\mathbf{T}^{-\mathrm{T}};\ \hat{\mathbf{G}}_\mathrm{O} = \mathbf{T}^\mathrm{T}\mathbf{G}_\mathrm{O}\mathbf{T}.$$

Руководствуясь известными результатами [10], применяем следующие выражения для определения матриц преобразования $\mathbf{T}$ через исходные и новые значения матриц диагонального разложения грамианов управляемости и наблюдаемости:

$$\mathbf{T} = \mathbf{U}_\mathrm{C}\boldsymbol{\Sigma}_\mathrm{C}^{1/2}\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_\mathrm{C}^{-1/2}\hat{\mathbf{U}}_\mathrm{C}^{-1} \quad \text{или} \quad \mathbf{T} = \mathbf{V}_\mathrm{O}^{-\mathrm{T}}\boldsymbol{\Sigma}_\mathrm{O}^{-1/2}\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_\mathrm{O}^{1/2}\hat{\mathbf{V}}_\mathrm{O}^\mathrm{T}.$$

Затем организуется пошаговая итерационная процедура, согласно которой изменениями структуры объекта в пределах одного (малого) шага коррекции сингулярных чисел грамианов пренебрегают, полагая $\hat{\mathbf{U}}_C = \mathbf{U}_C$ и $\hat{\mathbf{V}}_O = \mathbf{V}_O$, но изменяют значения обеих матриц после завершения преобразования подобия и сингулярного разложения на следующем шаге расчета.

Процедура коррекции системных свойств объекта реализуется путем изменения его параметров или введения в его структуру дополнительных связей, формируемых предрегулятором, описываемым соответствующей матрицей

$$\mathbf{A}' = \hat{\mathbf{A}} - \mathbf{A}.$$

Поскольку в расчете не накладываются ограничения на изменение передаточной функции $H_o(s)$ и матриц $\mathbf{U}_C$, $\mathbf{V}_O$ исходного объекта, то для получения желаемых сингулярных чисел $\hat{\Sigma}_C$ и $\hat{\Sigma}_O$ варьируют только часть элементов матрицы **A**, задаваемых двоичной матрицей-маской **E** сответствующей размерности в результате поэлементного произведения (применения оператора Адамара):

$$\mathbf{A}' = (\hat{\mathbf{A}} - \mathbf{A}) \circ \mathbf{E}.$$

Выполнение разработанных процедур создает основу для синтеза основного ПР, позволяющего обеспечить существенное улучшение робастных свойств создаваемых САУ.

Применим разработанный метод для синтеза робастной системы управления натяжением упругого длинномерного материала в зоне транспортирования поточной линии с использованием динамического ПР «входа–выхода».

Требуется обеспечить сохранение апериодического характера переходных процессов с допустимым отклонением быстродействия в пределах 15 % при заданных вариациях параметров объекта и 10 %-ных изменениях коэффициента петлевого усиления регулятора.

Предположим, что существует возможность воздействовать с помощью предрегулятора на элементы первой строки и первого столбца матрицы **A**. В этом случае соответствующую двоичную матричную маску следует задать в виде

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

В результате расчета и сингулярного разложения грамианов управляемости и наблюдаемости с использованием программного комплекса (ПК) MatLab имеем:

$$\Sigma_C = \mathrm{diag}\left\{139{,}61 \quad 18{,}64 \quad 2{,}11 \quad 4{,}28 \cdot 10^{-2}\right\};$$

$$\Sigma_O = \mathrm{diag}\left\{6{,}59 \cdot 10^{7} \quad 1{,}94 \cdot 10^{6} \quad 3{,}49 \cdot 10^{3} \quad 9{,}49\right\}.$$

Полученные результаты также свидетельствуют о низкой параметрической грубости синтезируемой системы, иллюстрируемой переходными характеристиками на рис. 4,а.

Итерационная коррекция сингулярных чисел обоих грамианов, выполненная разработанным методом, позволяет существенно улучшить системные свойства объекта

$$\hat{\Sigma}_C = \mathrm{diag}\left\{24{,}04 \quad 3{,}62 \quad 0{,}29 \quad 3{,}35 \cdot 10^{-2}\right\},$$

$$\hat{\Sigma}_O = \mathrm{diag}\left\{6{,}26 \cdot 10^{-2} \; 1{,}9 \cdot 10^{-2} \; 3{,}11 \cdot 10^{-2} \; 2{,}34 \cdot 10^{-2}\right\},$$

$$\|\mathbf{P}_U\|_1 = 4{,}28, \quad \|\mathbf{P}_V\|_1 = 23{,}19$$

за счет использования соответствующего предрегулятора

$$\mathbf{A}' = (\hat{\mathbf{A}} - \mathbf{A}) \circ \mathbf{E} = \begin{bmatrix} -5{,}11 & 36{,}02 & -35{,}17 & -0{,}065 \\ 6{,}45 & 0 & 0 & 0 \\ -5{,}99 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}63 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Это позволяет изменить расчетную модель ОУ:

$$\hat{A}(s) = 1{,}8 \cdot 10^{5} s^{2} + 2{,}26 \cdot 10^{6} s + 1{,}81 \cdot 10^{7},$$

$$\hat{B}(s) = s^{4} + 22{,}56 s^{2} + 228{,}37 s + 917{,}32 s + 246{,}03,$$

распределение ее нулей и полюсов (рис. 3,б) и сформировать новое (минимально-фазовое) управляющее устройство с полиномами ПФ:

$$\hat{R}(s) = 1{,}43 \cdot 10^{-2} s^{3} + 0{,}22 s + 1{,}97 s + 9{,}11,$$

$$\hat{C}(s) = s^{3} + 82{,}44 s^{2} + 56{,}79 s + 25{,}71 \cdot 10^{3},$$

обеспечивающее полное решение поставленной задачи в отношении распределения полюсов (рис. 3,в) и достижения заданных робастных свойств синтезированной САУ (рис. 4,б).

**Синтез робастной САУ ТМ по улучшенной расчетной модели объекта.** Следует принять во внимание, что при синтезе регуляторов робастных систем расчет обычно ведется по исходной модели ОУ с номинальными значениями параметров. Но при успешном решении задачи система оказывается способной обеспечить требуемые показатели качества при значительных параметрических вариациях реального ОУ.

В разработанном методе синтез основного регулятора ведется по модели ОУ с предрегулятором, т.е. по улучшенной расчетной модели объекта. В таком случае достижение робастных свойств полученной САУ может допускать значительные изменения расчетной модели, в том числе частичное или полное исключение из нее корректирующего предрегулятора при переходе к управлению реальным объектом.

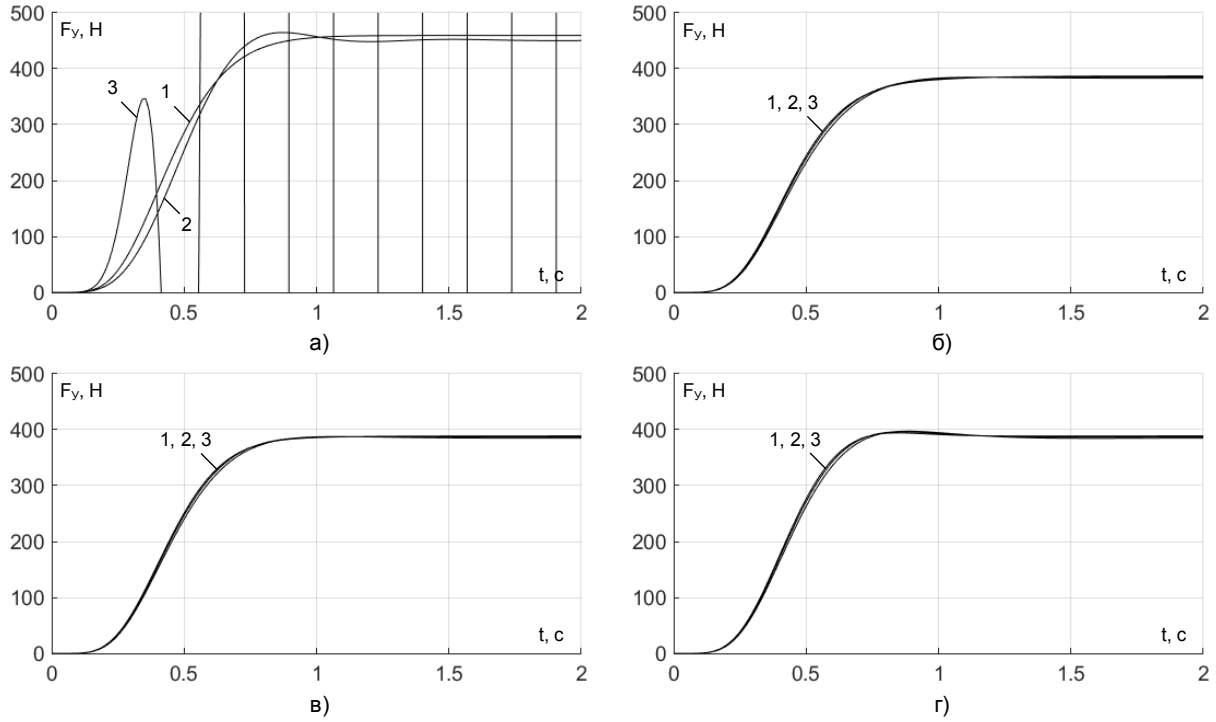



Рис. 4. Переходные характеристики 1, 2, 3 систем соответственно при номинальных параметрах ОУ и при их максимальных отклонениях в положительном и отрицательном направлениях: а – исходной САУ ТМ с ПР; б – синтезированной САУ ТМ; в – САУ ТМ после отключения предрегулятора; г – САУ ТМ после отключения предрегулятора при вариации коэффициента петлевого усиления регулятора в пределах ±10 %

Это имеет соответствующее «энергетическое» объяснение, состоящее в том, что при синтезе робастных САУ улучшение системных свойств ОУ достигается коррекцией меньших сингулярных чисел грамианов управляемости и наблюдаемости, которым соответствуют относительно малые энергетические воздействия на объект, формируемые предрегуляторами. В итоге последние вполне могут быть исключены из состава синтезированной с их помощью системы без существенного ухудшения достигнутых робастных свойств.

Таким образом, преобразованная (улучшенная) предрегулятором модель объекта становится расчетной для синтеза основного регулятора, а исходная модель ОУ с номинальными параметрами становится ее вариацией.

Синтез САУ по улучшенной модели объекта, условно названный методом СУМО, может считаться одной из версий более общего метода М.М. Лаврентьева, разработанного в [20] для решения некорректных задач путем замены исходного уравнения близким ему корректным уравнением и использованного позднее, например, в [21, 22].

Однако при этом остается открытым вопрос, как обеспечить необходимое улучшение системных свойств ОУ в наиболее типичном для САУ с динамическими ПР «входа–выхода» случае контроля только одной (выходной – регулируемой) координаты объекта и возможности управляющего воздействия только на один его вход.

Он предоставляет разработчику САУ новые творческие возможности улучшения их робастных свойств за счет использования виртуальных каналов управления и связей, т.е. таких корректировок матрицы **A**, которые могут присутствовать только в расчетной модели объекта для улучшения ее системных свойств, но не использоваться в реальной системе.

Так, в решаемой задаче была выявлена возможность исключения из состава робастной САУ ТМ, синтезированной разработанным методом, отдельных связей, формируемых предрегулятором, или полного отключения последнего с незначительным изменением достигнутого результата, т.е. сохранением требуемых показателей качества в заданных интервалах робастности.

В качестве иллюстрации на рис. 3,г приведено новое распределение полюсов синтезированной САУ ТМ, формируемое после отключения предрегулятора, а на рис. 4,в,г представлены соответствующие переходные характеристики системы в заданных интервалах изменения параметров ОУ и коэффициента петлевого усиления ПР, иллюстрирующие решение поставленной задачи.

Применение разработанного программного обеспечения, реализующего автоматизацию расчетных процедур с использованием стандартных матричных библиотек, позволяет существенно облегчить структурно-параметрический синтез робастной САУ ТМ и ускорить его выполнение.

**Выводы.** Использование разработанного грамианного подхода, дополненного возможностями метода СУМО, позволяет осуществлять целенаправленное улучшение системных свойств объекта с контролем степени управляемости и наблюдаемости на каждом этапе расчета и обеспечивает оперативное решение задач робастного управления транспортированием длинномерного упругого материала в составе двухканального агрегата с заданными показателями качества на основе использования динамического (полиномиального) регулятора «входа–выхода».

### Список литературы


1. **Айрапетьянц Г.М., Кожевников М.М., Ульянов М.И.** Моделирование динамики движения пленки на агрегате по производству полимерно-пленочных материалов // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 6. – С. 528–533.
2. **Дочвири Дж.Н.** Оптимизация переходных процессов многодвигательных тиристорных электроприводов с упругими связями для прессовых механизмов непрерывных технологических машин // Электричество. – 2006. – № 2. – С. 34–42.
3. **Стельмащук С.В., Капустенко Д.В.** Согласованное управление устройством транспортировки ленты с модальными регуляторами // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2019. – Т. 1, № 2(38). – С. 28–40.
4. **Шерышев М.А.** Производство изделий из полимерных листов и пленок. – СПб.: Научные основы и технологии, 2011.
5. **Иванов Г.М., Иванов А.Г.** Электропривод в химической и целлюлозно-бумажной отраслях промышленности. – М.: МГИУ, 2008.
6. **Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н.** Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. – М.: Изд. центр «Академия», 2007.
7. **Тарарыкин С.В., Софронов С.В.** Автоматизация процессов производства полимерного оптического волокна. – Иваново, 2002.
8. **Modeling** and matching design of a tension controller using pendulum dancer in roll-to-roll systems / H. Kang, C. Lee, K. Shin, S. Kim // IEEE Transactions on industry applications. – 2011. – Vol. 47, No. 4.
9. **Тютиков В.В., Тарарыкин С.В.** Робастное модальное управление технологическими объектами / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2006. – 256 с.
10. **Анисимов А.А., Тарарыкин С.В.** Итерационный метод структурно-параметрического синтеза робастных систем с регулятором состояния // Изв. РАН. Т и СУ. – 2018. – № 4. – С. 42–55.
11. **Кузовков Н.Т.** Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
12. **Воронов А.А.** Введение в динамику сложных управляемых систем. – М.: Наука, 1985. – 352 с.
13. **Крутько П.Д.** Полиномиальные уравнения и обратные задачи динамики управляемых систем // Изв. РАН. Техн. Кибернетика. – 1986. – № 1. – С. 125–133.
14. **Гайдук А.Р.** Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальных подход). – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 360 с.
15. **Тарарыкин С.В., Тютиков В.В.** Робастное модальное управление динамическими системами // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 5. – С. 41–55.
16. **Мироновский Л.А., Соловьев Т.Н.** Анализ и синтез модально-сбалансированных систем // А и Т. – 2013. – № 4. – С. 59–79.
17. **Бирюков Д.С., Дударенко Н.А., Ушаков А.В.** Контроль вырождения динамических систем: грамианный подход // Изв. вузов. Приборостроение. – 2013. – № 4. – С. 34–37.
18. **Oder R., McFarlen D.** Balanced Canonical Forms for Minimal System: A Normalized Coprime Factor Approach // Linear Algebra Appl. – 1989. – Vol. 122–124. – P. 23–64.
19. **Moore B.C.** Principal Component Analysis in Linear System: Controllability, Observability and Model Reduction // IEEE Trans. Automat. Control. – 1981. – V.AC-26. – P. 17–32.
20. **Лаврентьев М.М.** О некоторых некорректных задачах математической физики / Акад. наук СССР, Сиб. отд-ние. Ин-т математики. – Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния АН СССР, 1962. – 92 с.
21. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. – 2-е изд. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. – 285 с.
22. **Розенвассер Е.Н. Юсупов Р.М.** Чувствительность системы управления. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. – 464 с.


### References


1. Ayrapet'yants, G.M., Kozhevnikov, M.M., Ul'yanov, M.I. Modelirovanie dinamiki dvizheniya plenki na agregate po proizvodstvu polimerno-plenochnykh materialov [Modeling the dynamics of film movement along a unit to produce polymer-film materials]. *Nauka i tekhnika*, 2018, vol. 17, no. 6, pp. 528–533.
2. Dochviri, Dzh.N. Optimizatsiya perekhodnykh protsessov mnogodvigatel'nykh tiristornykh elektroprivodov s uprugimi svyazyami dlya pressovykh mekhanizmov nepreryvnykh tekhnologicheskikh mashin [Optimization of transient processes of multi-motor thyristor electric drives with elastic links for pressing mechanisms of continuous technological machines]. *Elektrichestvo*, 2006, no. 2, pp. 34–42.
3. Stel'mashchuk, S.V., Kapustenko, D.V. Soglasovannoe upravlenie ustroystvom transportirovki lenty s modal'nymi regulyatorami [Coordinated control of tape conveyor with modal controllers]. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, vol. 1, no. 2(38), pp. 28–40.
4. Sheryshev, M.A. *Proizvodstvo izdeliy iz polimernykh listov i plenok* [Manufacture of products from polymer sheets and films]. Saint-Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2011.
5. Ivanov, G.M., Ivanov, A.G. *Elektroprivod v khimicheskoy i tsellyulozno-bumazhnoy otraslyakh promyshlennosti* [Electric drive in chemical and cellulose-paper industries]. Moscow: MGIU, 2008.
6. Belov, M.P., Novikov, V.A., Rassudov, L.N. *Avtomatizirovannyy elektroprivod tipovykh proizvodstvennykh mekhanizmov i tekhnologicheskikh kompleksov* [Automated electric drive of standard produc-

tion mechanisms and technological complexes]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2007.

7. Tararykin, S.V., Sofronov, S.V. *Avtomatizatsiya protsessov proizvodstva polimernogo opticheskogo volokna* [Automation of polymer optical fiber production processes]. Ivanovo, 2002.

8. Kang, H., Lee, C., Shin, K., Kim, S. Modeling and matching design of a tension controller using pendulum dancer in roll-to-roll systems. IEEE Transactions on industry applications, 2011, vol. 47, no. 4.

9. Tyutikov, V.V., Tararykin, S.V. *Robastnoe modal'noe upravlenie tekhnologicheskimi ob"ektami* [Robust modal control of technological objects]. Ivanovo, 2006. 256 p.

10. Anisimov, A.A., Tararykin, S.V. Iteratsionnyy metod strukturno-parametricheskogo sinteza robastnykh sistem s regulyatorom sostoyaniya [Iterative method for structural-parametric synthesis of robust systems with state controller]. *Izvestiya RAN. T i SU*, 2018, no. 4, pp. 42–55.

11. Kuzovkov, N.T. *Modal'noe upravlenie i nablyudayushchie ustroystva* [Modal control and monitoring devices]. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 184 p.

12. Voronov, A.A. *Vvedenie v dinamiku slozhnykh upravlyaemykh system* [Introduction to dynamics of complex control systems]. Moscow: Nauka, 1985. 352 p.

13. Krut'ko, P.D. Polinomial'nye uravneniya i obratnye zadachi dinamiki upravlyaemykh sistem [Polynomial equations and inverse problems in dynamics of controlled systems]. *Izvestiya RAN. Tekhn. Kibernetika*, 1986, no. 1, pp. 125–133.

14. Gayduk, A.R. *Teoriya i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya (polinomial'nykh podkhod)* [Theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems (polynomial approach)]. Moscow: FIZMATLIT, 2012. 360 p.

15. 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.

16. Mironovskiy, L.A., Solov'ev, T.N. Analiz i sintez modal'no-sbalansirovannykh sistem [Analysis and synthesis of modally balanced systems]. *A i T*, 2013, no. 4, pp. 59–79.

17. Biryukov, D.S., Dudarenko, N.A., Ushakov, A.V. Kontrol' vyrozhdeniya dinamicheskikh sistem: gramiannyy podkhod [Degeneracy Control of Dynamical Systems: Gramian Approach]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2013, no. 4, pp. 34–37.

18. Oder, R., McFarlen, D. Balanced Canonical Forms for Minimal System: A Normalized Coprime Factor Approach. Linear Algebra Appl, 1989, vol. 122–124, pp. 23–64.

19. Moore, B.C. Principal Component Analysis in Linear System: Controllability, Observability and Model Reduction. IEEE Trans. Automat. Control, 1981, V.AC-26, pp. 17–32.

20. Lavrent'ev, M.M. *O nekotorykh nekorrektnykh zadachakh matematicheskoy fiziki* [On some ill-posed problems of mathematical physics]. Novosibirsk: Izdatel'stvo Sibirskogo otdeleniya AN SSSR, 1962. 92 p.

21. Tikhonov, A.N., Arsenin, V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving ill-posed problems]. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1979. 285 p.

22. Rozenvasser, E.N. Yusupov, R.M. *Chuvstvitel'nost' sistemy upravleniya* [Sensitivity of control system]. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1981. 464 p.

УДК 622.684

**Анатолий Брониславович Виноградов**
Научно-технический центр электропривода «Вектор», доктор технических наук, научный руководитель, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-08, e-mail: vinorg_ab@mail.ru

**Кирилл Константинович Ермаков**
Научно-технический центр электропривода «Вектор», аспирант, инженер-программист, Россия, Иваново, e-mail: nice.ermakov19@gmail.com

**Александр Александрович Коротков**
Научно-технический центр электропривода «Вектор», кандидат технических наук, инженер-программист, Россия, Иваново, e-mail: korotkov_alexand@mail.ru

# Удаленная работа с комплектом тягового электрооборудования карьерного самосвала

**Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Электромеханическая трансмиссия карьерного самосвала представляет собой комплекс электрооборудования, обладающего набором параметров для настройки и мониторинга состояния. Для повышения качества, снижения сроков и издержек сервисного обслуживания карьерных самосвалов организована система передачи данных, обеспечивающая удаленную работу с блоками системы управления. Подобные системы существенно повышают эффективность эксплуатации карьерных автосамосвалов при комплексном использовании стандартного подхода к техническому обслуживанию и ремонту горной техники и к мобильным технологиям, позволяют идентифицировать большую часть неисправностей за счет использования системы мониторинга параметров в режиме реального времени при штатной эксплуатации карьерного самосвала.
**Материалы и методы.** При разработке системы удаленной работы с комплектом тягового электрооборудования использованы методы проектирования и построения архитектуры программного обеспечения, методы объектно-ориентированного программирования и разработки многопоточных приложений с использованием высокоуровневого языка программирования C/C++.
**Результаты.** Предложена функциональная схема ретрансляции данных для удаленной работы с блоками электрооборудования. Приведено описание инструментального программного обеспечения для мониторинга и конфигурирования параметров электротрансмиссии самосвалов. Разработана процедура удаленной работы с комплектом тягового электрооборудования.
**Выводы.** Разработанная система проверена на этапах испытания и наладки комплектов, используется в реальных условиях эксплуатации и позволяет организовать сервисное обслуживание самосвалов отечественного производства на уровне, не уступающем лучшим импортным аналогам. Применение комплексного подхода в совокупности с расширением списка диагностических параметров электротрансмиссии при выделении ее как отдельного элемента системы диагностики значительно повышает качество сервисного обслуживания тягового электрооборудования.

**Ключевые слова:** электромеханическая трансмиссия, удаленное конфигурирование, программирование контроллеров, удаленный мониторинг параметров, система управления карьерным самосвалом

**Anatoliy Bronislavovich Vinogradov**
Electrical Drive Research and Technical Center “Vector”, Doctor of Engineering Sciences, Research Supervisor, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-08, e-mail: vinorg_ab@mail.ru

**Kirill Konstantinovich Ermakov**
Electrical Drive Research and Technical Center “Vector”, Postgraduate Student, Programming Engineer, Russia, Ivanovo, e-mail: nice.ermakov19@gmail.com

**Alexander Alexandrovich Korotkov**
Electrical Drive Research and Technical Center “Vector”, Candidate of Engineering Science, Programming Engineer, Russia, Ivanovo, e-mail: korotkov_alexand@mail.ru

# Remote work with a set of traction electrical equipment for mine dump truck

**Abstract**

**Background.** The electromechanical transmission of a mine dump truck is an electrical equipment complex with a set of parameters for setting and status monitoring. To improve the quality and to reduce the time and cost of service maintenance of mine dump trucks, a data transmission system is organized that provides remote work with control system

© Виноградов А.Б., Ермаков К.К., Коротков А.А., 2023
Вестник ИГЭУ, 2023, вып. 4, с. 63–69.

units. Such systems significantly increase the efficiency of operation of mine dump trucks with the integrated use of a standard approach to maintenance and repair of mining equipment and mobile technologies. They allow to identify most of the faults due to the use of a real-time parameter monitoring system during the routine operation of mine truck.
**Materials and methods.** The authors have used the methods of design and software architecture, methods of object-oriented programming and development of multi-threaded applications using the high-level programming language C/C++.
**Results.** The paper proposes a functional diagram of data transmission for remote operation with electrical equipment blocks. The description of the instrumental software for monitoring and configuring the parameters of the dump trucks electric transmission is given. A procedure for remote work with a set of traction electrical equipment has been developed.
**Conclusions.** The developed system has been tested at the stages of testing and adjustment. It is used in real operating conditions and allows organizing service maintenance of domestic-made dump trucks at a level that is not inferior to their best imported counterparts. The use of an integrated approach and the extended list of diagnostic parameters of the electric transmission when it is singled out as a separate element of the diagnostic system significantly improves the quality-of-service maintenance of traction electrical equipment.

**Key words:** electromechanical transmission, remote configuration, controller programming, remote monitoring of parameters, control system of dump truck

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.4.063-069

**Состояние вопроса.** Электромеханическая трансмиссия (ЭМТ) карьерного самосвала представляет собой сложный технический объект, часто работающий в неблагоприятных условиях: запыленность окружающего воздуха, экстремальные температуры и предельные нагрузки [1]. Согласно анализу финансовой составляющей по обслуживанию горной техники [2], самый высокий процент эксплуатационных расходов приходится на карьерные самосвалы (до 40 % от общего числа финансовых затрат). В связи с этим возникает необходимость мониторинга состояния трансмиссии, ведения статистики и анализа возникающих аварийных событий в целях внесения корректировок в программное обеспечение (ПО) или же своевременного проведения технического обслуживания и ремонта горной техники (ТОиР) по фактическому состоянию объекта. Основные преимущества эксплуатации по системе ТОиР, в отличие от традиционного подхода – планово-предупредительных ремонтов (ППР) по регламенту завода-изготовителя, приведены в [3]. Уровень развития технологий на базе имеющегося оборудования позволяет организовать системы удаленного мониторинга состояния параметров системы управления (СУ) ЭМТ [4]. Это существенно повышает эффективность эксплуатации карьерной техники при комплексном использовании ТОиР и мобильных технологий, поскольку классический подход при сервисном обслуживании транспортного средства не всегда позволяет выявить внутренние неполадки системы. При плановом осмотре выявляются внешние признаки неисправности – механические повреждения, течь, гарь. Некоторые признаки незаметны и могут быть зафиксированы только при замере рабочих параметров или путем демонтажа и частичной разборки блоков ЭМТ, что весьма ресурсозатратно. Большую часть неисправностей можно идентифицировать за счет использования системы мониторинга параметров в режиме реального времени при штатной эксплуатации карьерного самосвала [5]. В [5, 6] приведены примеры внедрения мобильных технологий в горную технику зарубежного производства. Применение комплексного подхода, рассмотренного в [3, 6], не позволяет решить задачи эффективного сервисного обслуживания, поскольку набор доступных параметров ЭМТ существенного ограничен. Используя подход, рассмотренный в [7], предлагается выделить электротрансмиссию как отдельный элемент и расширить список параметров для диагностики и предупреждения неисправностей.

Ниже предложен вариант построения системы передачи данных для организации удаленной работы с оборудованием ЭМТ карьерного самосвала, серийно выпускаемого в ОАО «БЕЛАЗ» (г. Жодино, Беларусь), рассмотрена схема передачи данных, приведено описание специального ПО, выполнено тестирование системы.

**Материалы и методы.** В комплект тягового электрооборудования (КТЭО) ЭМТ входят: синхронный тяговый генератор (СГТ); два тяговых асинхронных двигателя (ТАД); шкаф управления (ШПСУ) и блок контроллера верхнего уровня (КВУ) [8]. Блок КВУ, являясь центральным устройством, обрабатывает сигналы управления от водителя, передает данные на электронную панель приборов (ЭПП), управляет дизелем и блоками, входящими в состав ШПСУ: блоком контроллера системы возбуждения тягового генератора (СВТГ), двумя блоками контроллеров силовых преобразователей (КСП), блоком контроллера системы управления микроклиматом (СУМК) и блоком контроллера инвертора привода системы охлаждения (ИПСОх) для КТЭО карьерных самосвалов грузоподъемностью 240 т (рис. 1). Взаимодействие КВУ с блоками ШПСУ организовано по двум линиям CAN левого и правого бортов. Блок КВУ подключается к сети Ethernet для доступа к параметрам системы управления, считывания аварийных логов и истории событий, монито-

ринга переменных управления в реальном времени и обновления ПО.

Каждый блок ШПСУ выполняет определенные задачи. Блок КСП управляет силовыми преобразователями секций правого и левого бортов, реализуя алгоритмы адаптивно-векторного управления тяговым асинхронным двигателем, формирует сигналы управления силовыми транзисторами трехфазного инвертора и чоппера тормозного резистора [9]. Блок СВТГ управляет током возбуждения тягового генератора, поддерживая заданное напряжение на общей шине DC. Блок СУМК контролирует температуру и влажность внутри шкафа при работе и простое самосвала, выявляет и устраняет последствия воздействия резких перепадов температур и влаги, управляет приводом воздушной заслонки или трехходового крана (в случае жидкостного охлаждения). Блок ИПСОх осуществляет управление производительностью циркуляционного насоса внутреннего, замкнутого контура системы жидкостного охлаждения модулей ШПСУ. Управление ЭМТ осуществляется блоком КВУ, который обеспечивает обработку сигналов от органов управления и датчиков подсистем самосвала, управление оборотами двигателя внутреннего сгорания (ДВС), регулирование мощности тягового генератора, реализует алгоритмы управления движением, включая специальные режимы и функции. КВУ обеспечивает диспетчеризацию системы защит и диагностику состояния КТЭО [9].

В процессе эксплуатации самосвала выявляются различные режимы, требующие корректировки алгоритмов управления и последующее обновление ПО[1]. Задача наладчика, работающего на самосвале, в данном случае сводится к обеспечению канала обмена данными через сеть Internet и воспроизведение нештатных режимов работы ЭМТ. Удаленное подключение к комплекту оборудования позволяет без выезда на место (дистанционно) проводить диагностику, выявлять причины нештатной работы и оперативно вносить изменения, установив обновленное ПО. Следует отметить, что процедура удаленного подключения и работы с КТЭО значительно снижает время простоя самосвала, если проблема не связана с выходом из строя оборудования, повышает оперативность диагностики, но требует обеспечения надежного скоростного интернет-канала и должна выполняться в присутствии и под контролем технического специалиста[2].

**Результаты.** Для реализации удаленной работы с КТЭО разработан комплекс инструментального ПО, позволяющий установить связь персонального компьютера (ПК) специалиста сервисной службы с ПК наладчика, находящегося на самосвале.

Основным элементом схемы взаимодействия является сервер, выступающий связующим элементом между двумя абонентами сети Интернет (рис. 2).

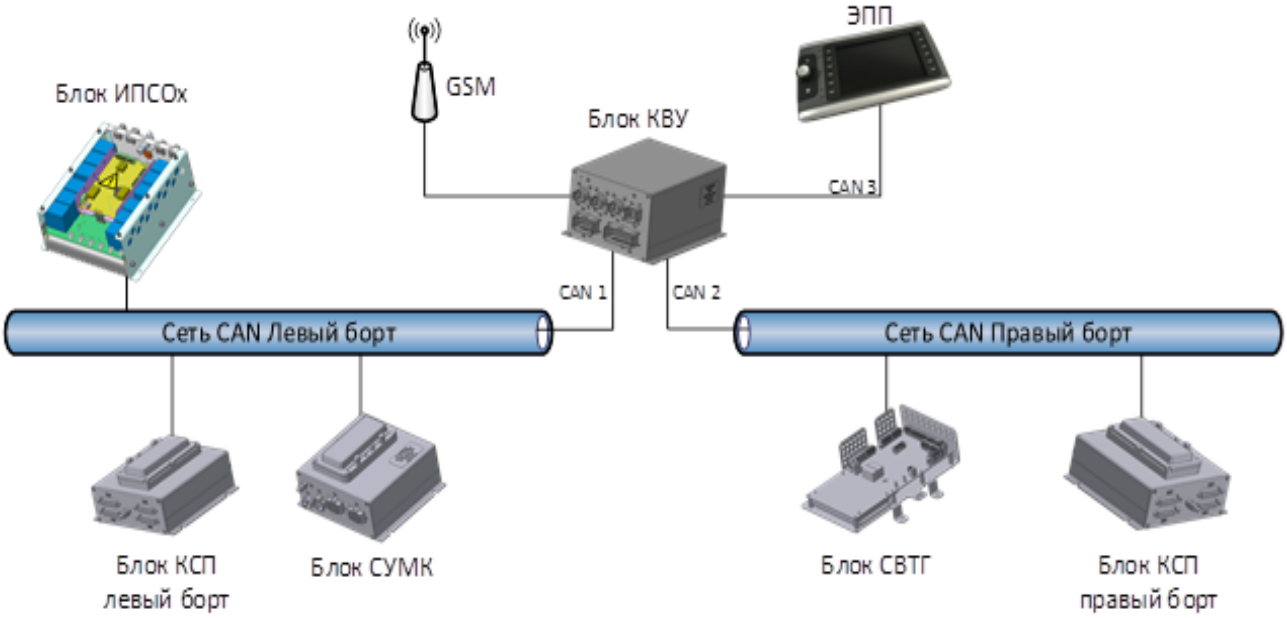



Рис. 1. Схема взаимодействия блоков КТЭО карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн

[1] Modernization of dump truck onboard system. – 2017. – URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/87/2/022017.
[2] Monitoring the Utilization of Dump truck in Coal Mines Using Internet of Thing (IoT). – 2019. – URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8978465

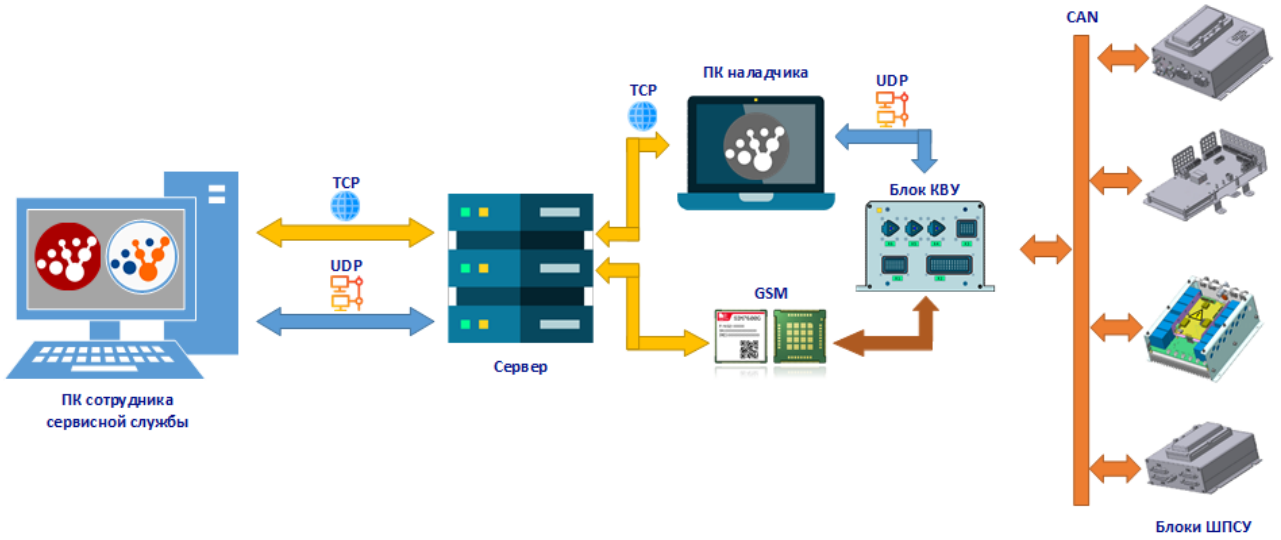



Рис. 2. Схема трансляции данных для удаленной работы с блоками КТЭО карьерного самосвала

К серверу подключаются:

1) сервисная служба, имеющая квалификацию в диагностике и настройке оборудования с использованием инструментального ПО, поддерживающего удаленное соединение. Связь осуществляется по протоколу TCP;

2) наладчик, используя инструментальное ПО, обеспечивающее сквозную передачу данных между сервером и блоком КВУ. Связь с сервером осуществляется по протоколу TCP, с КВУ – по протоколу UDP. В этом случае ПК наладчика выступает в качестве «сетевого моста», соединяя сервер с КВУ. Если в блок КВУ установлена плата расширения с модулем GSM, подключение к серверу выполняется автоматически при обнаружении сети, но для возможности настройки параметров и обновления ПО наладчик должен разрешить управление по сети GSM.

Рассмотрим процедуру удаленной работы с КТЭО. По сети Интернет к серверу подключаются с одной стороны клиенты (наладчики) и с другой – сотрудники сервисной службы, имеющие статус администратора. На стороне клиента работает программа трансляции данных, предоставляя администраторам прямой доступ к блоку КВУ и возможность мониторинга переменных, настройки параметров и обновления ПО блоков ШПСУ и КВУ.

В качестве клиента сервера также может выступать автономная система удаленного контроля и мониторинга, реализованная на базе встроенного в блок КВУ GSM модема.

Следует отметить, что практическое использование удаленного подключения имеет ограничение – самосвал должен находиться в зоне покрытия мобильной сети, что в реальных условиях эксплуатации не всегда выполняется.

Сервер выступает центральным элементом, который обеспечивает удаленную связь рабочих компьютеров сервисной службы с КТЭО. Уникальность протоколов, используемых для связи с интеллектуальными блоками трансмиссии, а также специфика задач удаленной работы с КТЭО (в частности, поддержка дистанционного программирования) определили основные требования, предъявляемые к серверу, и необходимость разработки собственного ПО.

При разработке сервера решены следующие задачи:

• авторизация зарегистрированных клиентов (наладчиков) и администраторов (работников сервисной службы) с уникальными логинами и паролями;

• возможность выбора администратором одного клиента из списка авторизованных на сервере и соединение с его ПК;

• обеспечение сквозной передачи данных между ПК администратора и ПК подключенного к нему клиента.

На данный момент серверное ПО представляет собой консольное приложение, разработанное на языке C++ и установленное на ПК, имеющем выход в Интернет. В программе реализованы работа монитора для ввода команд пользователей, возможность авторизации администратора, наладчика и суперадминистратора, сбор и систематизация данных клиентов. Удаленная сессия ограничивается двумя параллельно работающими каналами передачи данных «администратор–клиент», что не требует больших вычислительных мощностей.

В перспективе, по мере увеличения числа выпускаемых самосвалов, все более актуальными станут задачи автоматического сбора, обработки и хранения на сервере данных по скоростям движения самосвала, температурам силовых модулей и электрических машин, накопления статистики по аварийным со-

бытиям. Рассматривается возможность переноса программного обеспечения на VPS (Virtual Private Server).

Особенностью разработанного серверного ПО является его многопоточность [10]. Все каналы передачи данных выделены в отдельные потоки и изолированы, исключая, таким образом, возможность ошибочной передачи данных другому клиенту. Сервер может вести журнал удаленных сессий для анализа пользовательской активности. Перспективным, на наш взгляд, является разработка алгоритма анализа состояния ЭМТ по данным, полученным в автоматическом режиме, прогнозирование вероятностного выхода из строя элементов КТЭО и оповещение ответственных служб.

Для обновления программных кодов контроллеров ШПСУ и КВУ сотрудники сервисной службы используют программу EMTProg, которая позволяет подключаться к блокам нижнего уровня – напрямую по сети CAN (через USB-CAN адаптер Marathon), к блоку КВУ – по локальной сети Ethernet или через Сервер (в случае удаленной работы) (рис. 3).

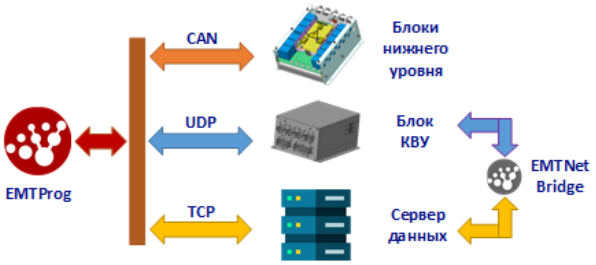



Рис. 3. Схема подключения EMTProg к блокам КТЭО

Программа разрабатывалась как универсальный и удобный инструмент для обновления ПО контроллеров КТЭО, который может быть использован на всех этапах производства и обслуживания на местах эксплуатации. Например, если требуется обновить программу блока ШПСУ, можно использовать подключение по сети CAN (предварительно отключив блок от общей сети) или выполнить обновление через КВУ, который должен быть подключен к программируемому блоку.

На данный момент EMTProg представляет собой графическое приложение, разработанное на языке C++. Программа использует dll-библиотеку, обеспечивающую взаимодействие с адаптером Marathon, сетевые сокеты для передачи данных по протоколам UDP и TCP, поддерживает команды подключения к серверу, запрос списка доступных клиентов (наладчиков) и соединение с клиентом по его имени. Интерфейс программы реализован так, чтобы пользователь имел возможность обновить ПО выбранного блока или всего комплекта в автоматическом режиме.

Работу в программе EMTProg можно разделить на 3 этапа:

1) чтение файла кодов программ (.fwc) и создание на его основе списка устройств доступных для программирования;

2) выбор устройства и способа подключения к нему, установка соединения и считывание информации о текущей версии исполняемой программы, уникальных идентификационных данных;

3) стирание и запись кодов программы для подключенного блока.

Планируется доработка EMTProg в части поддержки серверных команд идентификации клиентов: получение сведений об имени и должности наладчика, названии организации, в которой он работает.

Для настройки параметров и мониторинга переменных системы управления КТЭО сотрудники сервисной службы используют программу KVUApp. Данное приложение разрабатывалось как многофункциональный инструмент диагностики оборудования, расширенной настройки и наладки алгоритмов управления. Программа загружает и предоставляет доступ к списку параметров КВУ и блоков ШПСУ.

Программа KVUApp выполняет следующие функции:

- настройку параметров системы управления (для опытных пользователей);
- просмотр истории аварийных событий и считывание записей КБА (кольцевых буферов аварии);
- запись в файл и построение графиков (в реальном времени) значений переменных, предназначенных для анализа и мониторинга работы КТЭО;
- обновление программного обеспечения КВУ.

KVUApp – графическое приложение, разработанное на языке C++, которое позволяет подключаться к блоку КВУ только по локальной сети Ethernet. Для поддержки удаленной работы с КТЭО разработана утилита AppBind, предоставляющая возможность авторизации на сервере и соединения с клиентом (рис. 4) [10].

Рис. 4. Схема подключения KVUApp к блокам КТЭО

В случае возникновения аварийного события в КТЭО блок КВУ собирает всю необходи-

мую для последующего анализа информацию: сохраняет регистры и переменные управления, коды текущих защит, загружает кольцевые буферы аварии контроллеров ШПСУ. Наладчик на месте должен получить эти данные, провести первичный анализ, оценить возможность устранения причин и последствий аварии. Для этого используется приложение KVUApp.

Если наладчик не имеет достаточной квалификации, оперативный анализ аварийной ситуации может провести сотрудник сервисной службы, не выезжая на место работы самосвала. В этом случае задача наладчика – предоставить прямой доступ к оборудованию, выполнив подключение с одной стороны к блоку КВУ, с другой – к серверу (через Интернет), используя программу EMTNetBridge (рис. 2).

EMTNetBridge – приложение, разработанное на языке C++, основная задача которого заключается в соединении разнотипных сетей и организации канала передачи данных между сервером и КВУ. Приложение имеет следующий функционал: тестирование канала соединения с блоком КВУ и с сервером, авторизация клиента на сервере, обмен данными между КВУ и сервером, а также текстовыми сообщениями между наладчиком и работником сервисной службы [10]. Рассматривается возможность удаленного наблюдения или управления рабочим столом ПК наладчика в целях визуального контроля и помощи в ситуациях, требующих участия сервисной службы.

**Выводы**. Для поддержания карьерных самосвалов в рабочем состоянии сервисные службы выполняют задачи по ремонту и обслуживанию блоков и техники в целом. Это требует значительных материальных и кадровых ресурсов в виду сложной технической организации транспортного средства. В целях повышения эффективности работ по сервису разработчики КТЭО стремятся организовать наиболее функциональную и удобную систему мониторинга и настройки параметров. Все чаще данные системы используют функционал удаленного доступа, что повышает эффективность диагностики за счет оперативного доступа к массивам данных ЭМТ.

Разработанная система удаленной работы с блоками КТЭО карьерных самосвалов была проверена на этапах наладки и испытаний комплектов и показала свою эффективность в реальных условиях эксплуатации при обновлении ПО контроллеров и настройки параметров управления.

Между тем не каждый карьер (разрез) имеет стабильное покрытие мобильной сетью, требуемое для организации устойчивого удаленного соединения с оборудованием самосвала. Для решения этой проблемы требуется разработка алгоритмов накопления данных на стороне оборудования самосвала. Планируется расширение использования разработанного комплекса инструментального ПО в целях повышения эффективности работ по обслуживанию и ремонту карьерных самосвалов.

### Список литературы


1. **Модернизация** электротрансмиссии карьерных самосвалов по результатам длительной эксплуатации / А.Б. Виноградов, Н.Е. Гнездов, А.А. Коротков, В.Л. Чистосердов // Горный журнал. – 2022. – № 4. – С. 106–112. DOI: 10.17580/gzh.2022.04.16.
2. **Mackey J.** Heavy mine haul truck. Surrey: University of Surrey, 2015.
3. **Клебанов А.Ф., Сиземов Д.Н., Кадочников М.В.** Комплексный подход к удаленному мониторингу технического состояния и режимов эксплуатации карьерного автосамосвала // Горная промышленность. – 2020. – № 2. – С. 75–82.
4. **Владимиров Д.Я., Клебанов А.Ф., Кузнецов И.В.** Цифровая трансформация открытых горных работ и новое поколение карьерной техники // Горная промышленность. – 2020. – № 6. – С. 10–12.
5. **Hara H., Bartkoske A.J.** Real-time condition monitoring for mobile mine equipment // Modular mining systems. – 2008. – P. 16–17.
6. **Sander D.** Using technology in mobile equipment maintenance at teck coal to create a competitive advantage. Doctoral dissertation. – Canada: Simon Fraser University, 2011.
7. **Вишняков Г.Ю., Ботян Е.Ю.** Оценка современных систем мониторинга карьерных автосамосвалов // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – Вып. 2(160). – С. 51–57.
8. **Виноградов А.Б., Чистосердов В.Л., Сибирцев А.Н.** Комплекты тягового электрооборудования для карьерных самосвалов большой грузоподъемности // Добывающая промышленность. – 2017. – Вып. 2(06). – С. 90–93.
9. **Сибирцев А.Н., Виноградов А.Б, Чистосердов В.Л.** Комплект тягового электрооборудования карьерного самосвала грузоподъемностью 90 т. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – URL: http://vectorgroup.ru/ (дата обращения 28.06.2022).
10. **Ермаков К.К., Горелкин Р.О.** Разработка программного обеспечения для удаленного мониторинга и конфигурирования системы управления карьерного самосвала // «Тинчуринские чтения – 2022»: материалы конференции. В 3 т. Т. 3. − Казань: ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», 2022. – С. 44–48. – 605 с.


### References


1. Vinogradov, A.B., Gnezdov, N.E., Korotkov, A.A., Chistoserdov, V.L. Modernizatsiya elektrotransmissii kar'ernykh samosvalov po rezul'tatam dlitel'noy ekspluatatsii [Modernization of electromechanical transmission for dump trucks based on long-term operation data]. *Gornyy zhurnal*, 2022, no. 4(2297), pp. 106–112. DOI: 10.17580/gzh.2022.04.16.
2. Mackey, J. Heavy mine haul truck. Surrey: University of Surrey, 2015.
3. Klebanov, A.F., Sizemov, D.N., Kadochnikov, M.V. Kompleksnyy podkhod k udalennomu monitoringu tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov ekspluatatsii kar'ernogo avtosamosvala [Integrated approach to

remote monitoring of techical and operation conditions of mine dump trucks]. *Gornaya Promyshlennost'*, 2020, no. 2, pp. 75–82.

4. Vladimirov, D.Ya., Klebanov, A.F., Kuznetsov, I.V. Tsifrovaya transformatsiya otkrytykh gornykh rabot i novoe pokolenie kar'ernoy tekhniki [Digital transformation of open pit mining and a new generation of open pit equipment]. *Gornaya Promyshlennost'*, 2020, no. 6, pp. 10–12.

5. Hara, H., Bartkoske, A.J. Real-time condition monitoring for mobile mine equipment. Modular mining systems, 2008, pp. 16–17.

6. Sander, D. Using technology in mobile equipment maintenance at teck coal to create a competitive advantage. Doctoral dissertation. Canada: Simon Fraser University, 2011.

7. Vishnyakov, G.Yu., Botyan, E.Yu. Otsenka sovremennykh sistem monitoringa kar'ernykh avtosamosvalov [Evaluation of modern monitoring systems of dump trucks]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2022, issue 2(160), pp. 51–57.

8. Vinogradov, A.B., Chistoserdov, V.L., Sibirtsev, A.N. Komplekty tyagovogo elektrooborudovaniya dlya kar'ernykh samosvalov bol'shoy gruzopod"emnosti [Electrical Traction Equipment Sets for Heavy Duty Mining Dump Trucks]. *Dobyvayushchaya promyshlennost'*, 2017, issue 2(06), pp. 90–93.

9. Sibirtsev, A.N., Vinogradov, A.B, Chistoserdov, V.L. *Komplekt tyagovogo elektrooborudovaniya kar'ernogo samosvala gruzopod"emnost'yu 90 t. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Electrical Traction Equipment Set for a Mining Dump Truck with Load Carrying Capacity 90 tons. Operation manual]. Available at: http://vectorgroup.ru/ (access date 28.06.2022).

10. Ermakov, K.K., Gorelkin, R.O. Razrabotka programmnogo obespecheniya dlya udalennogo monitoringa i konfigurirovaniya sistemy upravleniya kar'ernogo samosvala [Software Development for Remote Monitoring and Configuration of the Mining Dump Truck Control System]. *Materialy konferentsii «Tinchurinskie chteniya – 2022» v 3 t., t. 3, Kazan', 27–29 April 2022 g.* [Development of software for remote monitoring and configuration of the mine dump truck control system]. Kazan', 2022, pp. 44–48. 605 p.

УДК 621.31

**Леонид Григорьевич Зотов**
НГТУ «Новосибирский государственный технический университет», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ радиотехники, Россия, Новосибирск, e-mail: zotovlg@mail.ru

**Иван Михайлович Большаков**
НГТУ «Новосибирский государственный технический университет», магистрант кафедры электронных приборов, Россия, Новосибирск, e-mail: ivan_bolshakov_99@mail.ru

# Энергоэффективный конденсаторный DC-DC преобразователь для автономной системы электроснабжения

**Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Главное требование, предъявляемое к автономным системам электроснабжения, – улучшенные массогабаритные и энергетические показатели. Перспективным направлением решения данной проблемы является применение преобразователей постоянного напряжения на основе резонансных структур с переключаемыми конденсаторами. Улучшение энергетических показателей преобразователя достигается за счет использования режима мягкой коммутации применяемых в них полупроводниковых элементов, обеспечивающего снижение динамических потерь мощности, и увеличения уровня напряжения первичного источника. Улучшение массогабаритных показателей преобразователя обеспечивается многотактным принципом построения, позволяющим значительно увеличить частоту преобразования до нескольких сотен килогерц благодаря кратному уменьшению установленной мощности полупроводниковых элементов; высокими удельными энергетическими показателями современных многослойных керамических конденсаторов, более чем на два порядка превышающими аналогичные показатели реакторов и трансформаторов; оптимизацией параметров полупроводниковых и реактивных элементов, способствующей дополнительному снижению массы и объема системы электроснабжения.
**Материалы и методы.** Анализ массогабаритных показателей повышающего преобразователя постоянного напряжения и оценка величины его КПД проведены в предположении пропорциональности массы и объема реактивных элементов преобразователя максимальной накапливаемой в них энергии и пропорциональности массы и объема полупроводниковых элементов их установленной мощности.
**Результаты.** Предложена и исследована схема разнополярного преобразователя постоянного напряжения на основе структур с переключаемыми конденсаторами, обладающая пространственной симметрией, обеспечивающей значительное улучшение массогабаритных показателей за счет двукратного снижения суммарной установленной мощности применяемых полупроводниковых элементов. Оценены объемные и энергетические показатели исследуемого преобразователя в составе системы электроснабжения. Предложен метод построения силовой цепи конденсаторного преобразователя с улучшенными энергетическими и массогабаритными показателями в составе автономной системы электроснабжения.
**Выводы.** Установлены наиболее эффективные способы улучшения массогабаритных и энергетических показателей преобразователей постоянного напряжения: улучшение массогабаритных показателей достигнуто двукратным снижением величины установленной мощности полупроводниковых элементов и оптимизацией параметров реактивных элементов; улучшение энергетических показателей достигнуто повышением уровня входного напряжения преобразователя и мягкой коммутацией его полупроводниковых элементов.

**Ключевые слова:** автономная система, установленная мощность полупроводниковых элементов, преобразователь постоянного напряжения, солнечные модули, структура с переключаемыми конденсаторами

**Leonid Grigorievich Zotov**
Novosibirsk State Technical University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Theoretical Foundations of Radio Engineering Department, Russia, Novosibirsk, e-mail address: zotovlg@mail.ru

**Ivan Mikhailovich Bolshakov**
Novosibirsk State Technical University, Master Degree Student of Electronic Devices Department, Russia, Novosibirsk, e-mail: ivan_bolshakov_99@mail.ru

# Energy efficient capacitor DC-DC converter for autonomous power supply system

**Abstract**

**Background.** The main requirement for autonomous power supply systems is improved weight-size and energy parameters. A promising way to solve this problem is to use DC-DC converters based on resonant structures with switched capacitors. Improvement of energy indicators of the converter is achieved due to soft-switching mode of semiconductor

© Зотов Л.Г., Большаков И.М., 2023
Вестник ИГЭУ, 2023, вып. 4, с. 70–76.

elements providing reduction of dynamic power losses and increasing the level of the primary source. Improvement of weight-size parameters of the converter is provided due to the following: multi-cycle principle of the design providing a significant increase of frequency conversion up to several hundred kHz due to multiple reduction of installed capacity of semiconductor elements; high specific energy indicators of modern multilayer ceramic capacitors, more than two orders of magnitude higher than similar indicators of reactors and transformers; optimization of parameters of semiconductor and reactive elements, which also contributes to significant reduction of weight and volume of power supply systems.
**Materials and methods.** The authors have conducted the analysis of weight-size parameters of the step-up DC-DC converter and the value of its efficiency under the assumption of proportionality of weight and volume of reactive converter elements to the maximum accumulated energy and proportionality of weight and volume of semiconductor elements to their installed capacity.
**Results.** The authors have proposed and studied the circuit of multipolar DC-DC converter based on structures with switched capacitors, which has the space symmetry. The space symmetry provides a significant improvement of weight-size parameters due to two-fold reduction of the total installed capacity of semiconductor elements. The volume and energy indicators of the converter under study as a part of power supply system have been evaluated. A method to design a power circuit of a capacitor converter with improved energy and weight-size parameters as a part of an autonomous power supply system is proposed.
**Conclusions.** The authors have established the most effective ways to improve the weight-size and energy indicators of DC voltage converters. The improvement of weight-size parameters is achieved due to a twofold reduction of the installed capacity of semiconductor elements and optimization of the parameters of reactive elements. Improvement of energy indicators is achieved due to increasing the input voltage level of the converter and soft switching of its semiconductor elements.

**Key words:** autonomous system, installed capacity of semiconductor elements, DC-DC converter, solar modules, structures with switched capacitors

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.4.070-076

**Введение.** Главные требования к автономным системам электроснабжения (АСЭ) – улучшение энергетических и массогабаритных показателей.

Коэффициент полезного действия (КПД) современных преобразователей постоянного напряжения (ППН) в составе АСЭ с широтно-импульсным (ШИМ) регулированием в основном определяется динамическими потерями мощности вследствие жесткой коммутации транзисторных ключей (ТК). Поэтому перспективным направлением повышения энергоэффективности АСЭ является снижение динамических потерь мощности за счет применения режима мягкой коммутации ТК. Применение в АСЭ многотактных повышающих преобразователей постоянного напряжения на основе резонансных структур с переключаемыми конденсаторами ППН (РСПК) обеспечивает не только повышение КПД, но и существенно снижает уровень создаваемых ею импульсных помех [1–10].

**Методы исследования. Структура и принцип работы DC-DC преобразователя.** Структурная схема описываемой АСЭ приведена на рис. 1.

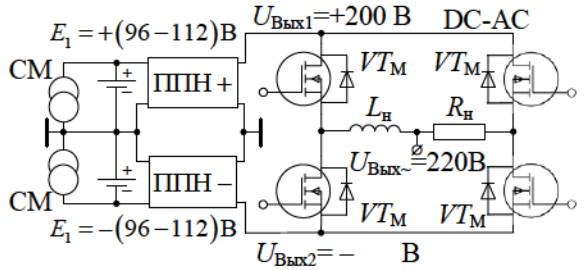



Рис. 1. Структурная схема автономной системы электроснабжения

В целях повышения КПД и упрощения силовой цепи в ней применен первичный источник, состоящий из двух групп, каждая из которых образована четырьмя соединенными последовательно солнечными модулями (СМ) RZMP 240-T. Такое техническое решение позволяет применить разнополярную (относительно общей шины) аккумуляторную батарею (АБ) с достаточно высоким выходным напряжением $E_1$ = ±96–112 В.

Далее с помощью разнополярного ППН (РСПК), состоящего из блоков ППН+ и ППН–, это напряжение удваивается и подается на вход мостового однофазного инвертора с изолированной нейтралью и выходным действующим напряжением 220 В.

Разделение силовой цепи преобразователя на два блока с выходными напряжениями положительной и отрицательной полярности обеспечивает двукратное снижение величины установленной мощности применяемых в них полупроводниковых элементов. Благодаря этому достигается двукратное увеличение частоты преобразования ППН (РСПК) $f_П$, обеспечивающее значительное снижение массы и объема АСЭ.

Блоки ППН+ и ППН– построены по многотактной схеме. Их силовая цепь ППН+ и ППН– состоит из $k$ = 5 соединенных параллельно по входу и выходу повышающих преобразовательных модулей (ПМ) ПМ+ и ПМ– на основе РСПК. В результате достигается не только $k$-кратное снижение коэффициента гармоник входного и выходного токов, но и дополнительное увеличение частоты преобразования ППН (РСПК) [3]. Принципиальные схемы силовой цепи модулей ПМ+ и ПМ– представлены на рис. 2.

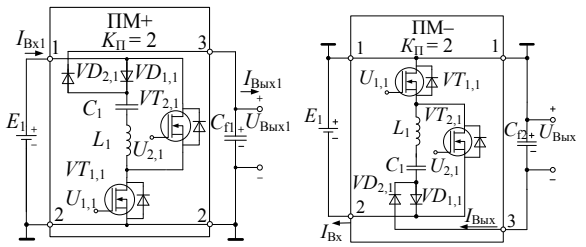



Рис. 2. Принципиальные схемы модулей ПМ+ и ПМ–

Работа ПМ основана на периодическом параллельном заряде конденсаторов $C_1$ от АБ с их последующим последовательным с ней разрядом на нагрузку через соответствующий разрядный ключ $VT_{2,1}$. В результате коэффициент преобразования $K_П$ ППН+ и ППН– оказывается равным двум.

На рис. 3 представлены принципиальные схемы модулей ПМ+ и ПМ– с напряжением первичного источника в диапазоне $E_1$ = ±48–60 В. Для достижения требуемого уровня выходного напряжения число индуктивно-конденсаторных цепочек равно $N$ = 3, коэффициент преобразования равен $K_П$ = 4.

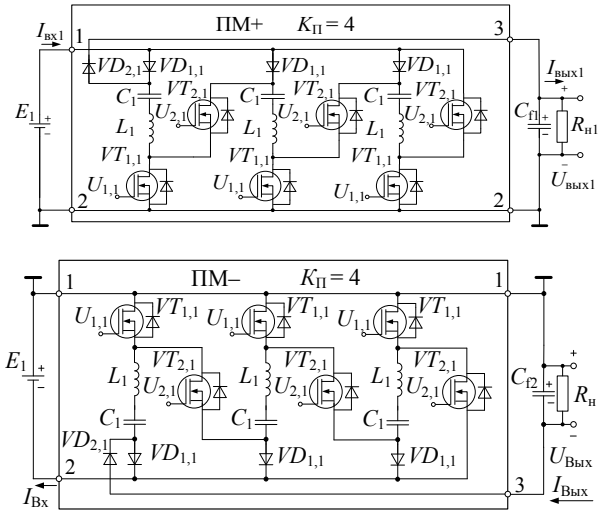



Рис. 3. Принципиальные схемы модулей ПМ+ и ПМ– при $E_1$ = ±48–60 В

Благодаря тому что заряд и разряд конденсатора $C_1$ происходят через последовательно соединенный с ним реактор $L_1$, коммутация зарядных и разрядных диодов и ТК осуществляется в мягком режиме в моменты времени, когда их токи равны нулю.

Работа ПМ равномерно распределена по периоду $T_П$ частоты преобразования $f_П$, т.е. импульсы управления ТК отдельных ПМ сдвинуты относительно друг друга на время $\Delta t = \frac{T_П}{k} = \frac{1}{k f_П}$. Временные диаграммы, поясняющие работу блоков ППН+ и ППН–, приведены на рис. 4.

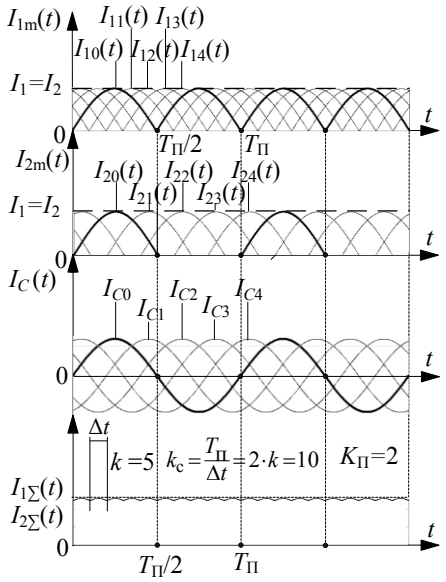



Рис. 4. Временные диаграммы токов ППН+ и ППН–

Параметры реактивных элементов силовой цепи многотактного ППН (РСПК) определяются из условия обеспечения заданной величины его максимальной выходной мощности и реализации мягкой коммутации полупроводниковых элементов с помощью следующих выражений [3]:

$$C_1 = \frac{P_V}{2(N+1)\, k\, f_П \left(E_1^*\right)^2 \delta_{C1}}; \quad C_{f1} = C_{f2} \geq \frac{\alpha\, C_1}{k}; \; L_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_П^2\, C_1}, \tag{1}$$

где $P_V$ = 5 кВт – максимальная выходная мощность ППН (РСПК); $E_1^* = E_1 - E_{VD}$ – среднее значение напряжения на конденсаторах $C_1$ ППН (РСПК); $E_{VD}$ – напряжение отсечки диода $VD_{1,1}$ в ППН+ и ППН–; $f_П$ – частота преобразования ПМ, равная частоте коммутации его ТК; $\delta_{C1} = \frac{\Delta U_{C1}}{E_1^*}$ – относительный коэффициент пульсации напряжения на конденсаторах $C_1$; $\alpha$ = 3 – для $k$ = 1 и четных значений $k$, $\alpha$ = 1,5 – для нечетных значений $k$ > 1.

Массогабаритные показатели ППН (РСПК) дополнительно улучшаются оптимальным выбором параметров его реактивных элементов. При этом их массу и объем удобно оценить величиной максимальной суммарной накапливаемой конденсаторами и реакторами энергии $\varepsilon_{\Sigma C1}$ и $\varepsilon_{\Sigma L1}$ [3]:

$$\begin{pmatrix} M_\Sigma(k,\delta_{C1}) \\ V_\Sigma(k,\delta_C) \end{pmatrix} = 2 \cdot \begin{pmatrix} k_{MC1} \\ k_{VC1} \end{pmatrix} \varepsilon_{\Sigma C1}(k,\delta_{C1}) + 2 \cdot \begin{pmatrix} k_{ML1} \\ k_{VL1} \end{pmatrix} \varepsilon_{\Sigma L1}(k,\delta_{C1}), \tag{2}$$

где $k_{MC1}\left[\frac{\text{кг}}{\text{Дж}}\right]$, $k_{VC1}\left[\frac{\text{м}^3}{\text{Дж}}\right]$, $k_{ML1}\left[\frac{\text{кг}}{\text{Дж}}\right]$, $k_{VL1}\left[\frac{\text{м}^3}{\text{Дж}}\right]$ – удельные массообъемные показатели конденсаторов $C_1$ и реакторов $L_1$.

Максимальная суммарная энергия, накапливаемая конденсаторами $C_1$ ППН (РСПК), определяется следующим выражением:

$$\begin{pmatrix} M_\Sigma(k,\delta_{C1}) \\ V_\Sigma(k,\delta_C) \end{pmatrix} = 2\cdot\begin{pmatrix} k_{MC1} \\ k_{VC1} \end{pmatrix}\varepsilon_{\Sigma C1}(k,\delta_{C1}) + \\ +2\cdot\begin{pmatrix} k_{ML1} \\ k_{VL1} \end{pmatrix}\varepsilon_{\Sigma L1}(k,\delta_{C1}), \quad (3)$$

где $U_{C1\max} = E_1^* + 0{,}5\cdot\Delta U_{C1} = E_1^*(1+0{,}5\cdot\delta_{C1})$ – величина максимального напряжения на конденсаторе $C_1$.

Аналогично выражение для максимальной суммарной энергии, накапливаемой реакторами $L_1$ ППН (РСПК), имеет вид

$$\varepsilon_{\Sigma L1} = k\,L_1 I_{L1\max}^2 = \frac{I_\text{Н}\,E_1^*\,\delta_{C1}}{4\,k\,f_\Pi}, \quad (4)$$

где $I_{L1\max} = \frac{\pi}{k}\cdot I_\text{Н}$ – амплитуда тока через реактор $L_1$.

В результате выражение для массогабаритных показателей реактивных элементов ППН (РСПК) принимает вид

$$\begin{pmatrix} M_\Sigma(k,\delta_{C1}) \\ V_\Sigma(k,\delta_{C1}) \end{pmatrix} = \left[\frac{I_\text{Н}\,E_1^*}{k\,f_\Pi}\right]\times \\ \times\left[\begin{pmatrix} k_{MC1} \\ k_{VC1} \end{pmatrix}\frac{(1+0{,}5\cdot\delta_{C1})^2}{\delta_{C1}} + \begin{pmatrix} k_{ML1} \\ k_{VL1} \end{pmatrix}\frac{\delta_{C1}}{4}\right] \quad (5)$$

или после нормировки

$$\begin{pmatrix} \overline{M}_\Sigma(\delta_{C1}) \\ \overline{V}_\Sigma(\delta_{C1}) \end{pmatrix} = \frac{(1+0{,}5\cdot\delta_{C1})^2}{\delta_{C1}} + \gamma_{M,V}\,\frac{\delta_{C1}}{4}, \quad (6)$$

где $\gamma_\text{M} = \frac{k_{ML1}}{k_{MC1}}$, $\gamma_V = \frac{k_{VL1}}{k_{VC1}}$ – относительные нормировочные коэффициенты.

Графические зависимости нормированных величин массы и объема DC-DC преобразователя $\overline{M}_\Sigma(\delta_{C1}), \overline{V}_\Sigma(\delta_{C1})$ представлены на рис. 5.

Оптимальные величины $\delta_{C1(opt)}$, доставляющие минимум функциям нормированных значений $\overline{M}_\Sigma(\delta_{C1}), \overline{V}_\Sigma(\delta_{C1})$, определяются из условия

$$\frac{\partial}{\partial\delta_{C1}}\begin{pmatrix} \overline{M}(\delta_{C1}) \\ \overline{V}(\delta_{C1}) \end{pmatrix} = \frac{0{,}25\cdot\delta_{C1}^2 - 1}{\delta_{C1}^2} + 0{,}25\,\gamma_{M,V} = 0.$$

Из этого следует, что оптимальная величина коэффициента пульсации напряжения на конденсаторах $C_1$ в ППН (РСПК) определяется выражением

$$\delta_{C1(opt)}(\gamma_{M,V}) = 2\cdot\sqrt{\frac{1}{1+\gamma_{M,V}}}. \quad (7)$$

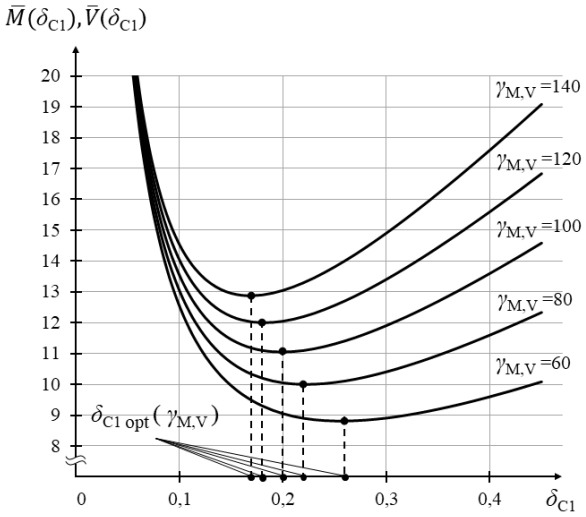



Рис. 5. Зависимости $\overline{M}_\Sigma(\delta_{C1}), \overline{V}_\Sigma(\delta_{C1})$

**Результаты исследования.** Цель исследования – подтверждение эффектов улучшения массогабаритных и энергетических показателей АСЭ за счет снижения величины суммарной установленной мощности применяемых полупроводниковых элементов и применения АБ с высоким выходным напряжением.

Двукратное снижение установленной мощности полупроводниковых элементов позволяет применить транзисторные ключи IPA075N15N3GXKSA1 с напряжением $U_{VT(\max)}$ = = 150 В, максимальным током $I_{VT(\max)}$ = 43 А и сопротивлением сток-исток $R_{DS}$ = 5,9 мОм. В однополярной схеме преобразователя применяются транзисторы FDA38N30 с напряжением $U_{VT(\max)}$ = 300 В, максимальным током $I_{VT(\max)}$ = 38 А и сопротивлением сток-исток $R_{DS}$ = 85 мОм.

Максимальная частота коммутации транзисторов определяется выражением [1]

$$f_S = \frac{0{,}01}{t_{d(on)} + t_{d(off)}}, \quad (8)$$

где $t_{d(on)}$, $t_{d(off)}$ – время включения и выключения транзистора.

Выражение (8) получено в предположении, что суммарное время ($t_{d(on)}$ + $t_{d(off)}$) составляет 1 % от периода коммутации транзистора $T_S$.

Для IPA075N15N3GXKSA1 при токе 11 А $t_{d(on)}$ = 22 нс, $t_{d(off)}$ = 50 нс, $f_S$ = 139 кГц. При этом транзистор FDA38N30 имеет $t_{d(on)}$ = 53 нс, $t_{d(off)}$ = 118 нс, т.е. его частота коммутации составляет $f_S$ = 58 кГц. Частота коммутации транзисторного ключа IPA075N15N3GXKSA1 в 2,4 раза превышает аналогичную величину для FDA38N30, имеющего почти в 2 раза большую величину установленной мощности.

Объем IPA075N15N3GXKSA1 составляет $V_{VT1}$ = 0,689 см³, объем FDA38N30 – $V_{VT2}$ = 1,628 см³

Напряжение отсечки примененных полупроводниковых диодов VS-150EBU02 имеет величину $E_{VD}$ = 0,68 В, а их дифференциальное сопротивление $R_D$ = 2,7·10⁻³ Ом. Время обратного восстановления диодов составляет $t_{rr}$ = 45 нс, что говорит о возможности их функционирования на максимальной частоте $f_S$ = 200 кГц. Объем диода составляет $V_{VD}$ = 0,976 см³.

В разнополярном преобразователе применены многослойные керамические конденсаторы К10-84 с максимальным напряжением $U_{C\max}$ = 150 В и реакторы AMPLB1040 с максимальным током $I_{L\max}$ = 11 А и удельными массо-объемными коэффициентами:

$$k_{VC1} = 2{,}756 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\text{м}^3}{\text{Дж}}\right];\ k_{VL1} = 2{,}81 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{м}^3}{\text{Дж}}\right].$$

Оптимальная величина относительной пульсации на конденсаторах, согласно (7), составляет

$$\delta_{C1(opt)} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{k_{VL1}}{k_{VC1}}}} = 0{,}2.$$

Согласно (1), величины параметров конденсаторов $C_1$ и реакторов $L_1$ оказываются равными соответственно:

$$C_1 = \frac{5 \cdot 10^3}{4 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 10^5 (112 - 0{,}68)^2 \cdot 0{,}2} = 0{,}5 \cdot 10^{-6}\,\text{Ф};$$

$$L_1 = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \left(2 \cdot 10^5\right)^2 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-6}} = 12{,}66 \cdot 10^{-7}\,\text{Гн};$$

$$C_{f1} = C_{f2} = \frac{1{,}5 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-6}}{5} = 0{,}15 \cdot 10^{-6}\,\text{Ф}.$$

В однополярном преобразователе могут быть применены конденсаторы $C_1$ = 0,25 мкФ с максимальным напряжением $U_{C\max}$ = 250 В и реакторы AMPLB1040 с максимальным током $I_{L\max}$ = 11 А.

Объем конденсатора и реактора в разнополярном преобразователе составляет $V_{C1}$ = 0,31 см³ и $V_{L1}$ = 0,43 см³ соответственно, в однополярном объем конденсатора $V_{C1}$ = 0,62 см³, объем реактора $V_{L1}$ = 0,43 см³.

Суммарный объем полупроводниковых и реактивных элементов разнополярного преобразователя равен $V_\Sigma$ = 8,14 см³. Для однополярной схемы суммарный объем в 2 раза больше и составляет $V_\Sigma$ = 16,82 см³.

Работа DC-DC преобразователя ППН (РСПК) исследована экспериментально. Частота преобразования равна $f_П$ = 200 кГц.

Поскольку выходное напряжение исследуемого преобразователя является разнополярным, то максимальная мощность каждого из блоков ППН+ и ППН– равна половине максимальной выходной мощности ППН (РСПК):

$$P_{V(Б)} = \frac{P_V}{2} = 2{,}5\ \text{кВт}. \qquad (9)$$

Точное выражение для среднего значения выходного напряжения ППН+ и ППН– имеет вид

$$U_{вых1} = U_{вых2} = \frac{E_1(N+1) - N E_{VD11} - E^*_{VD21}}{1 + \frac{\pi^2}{4 \cdot R_н}\left[\frac{N\,(r_{VD11} + r_{VT11} + r_{VT21}) + r^*_{VD21}}{k_1}\right]}, \qquad (10)$$

где $E^*_{D21} = E_{D11}(1 - \delta_{N,0})$, $r^*_{D21} = r_{D21}(1 - \delta_{N,0})$ – напряжение отсечки и дифференциальное сопротивление разрядных $VD_{2,1}$ диодов; $2 \cdot R_н$ – сопротивление нагрузки ППН (РСПК); $\delta_{N,0} = \begin{pmatrix} 1 - \text{для } N = 0 \\ 0 - \text{для } N \neq 0 \end{pmatrix}$ – символ Кронекера.

Среднее значение тока в нагрузке ППН (РСПК) равно среднему значению токов через его полупроводниковые элементы

$$I_Н = \frac{P_{V(Б)}}{U_{вых}} = 11{,}22\ \text{А}. \qquad (11)$$

Амплитуда тока через элементы силовой цепи блоков преобразователя определяется выражением

$$I_{L1\max} = 11{,}22 \frac{\pi}{5} = 7{,}05\ \text{А},$$

что соответствует его экспериментальному значению на осциллограмме рис. 6.

На рис. 7 представлена осциллограмма напряжения на отдельном конденсаторе силовой цепи преобразователя $C_1$.

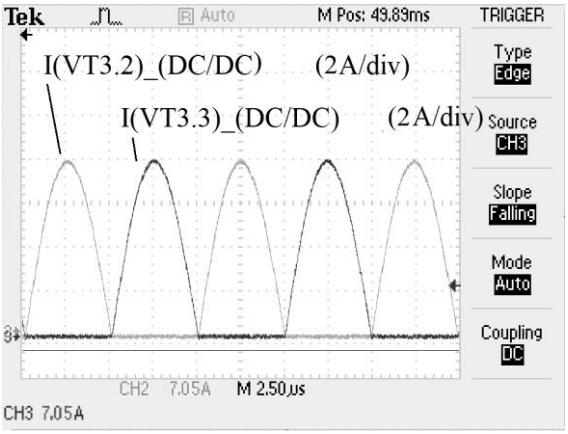



Рис. 6. Осциллограмма тока через зарядный и разрядный транзисторы

Анализ полученной осциллограммы (рис. 7) показывает, что экспериментальная величина относительного коэффициента пульсации напряжения на конденсаторах соответствует его оптимальному теоретическому значению

$$\delta_{C1(opt)} = \frac{\Delta U_{C1}}{E^*_1} = 0{,}2.$$

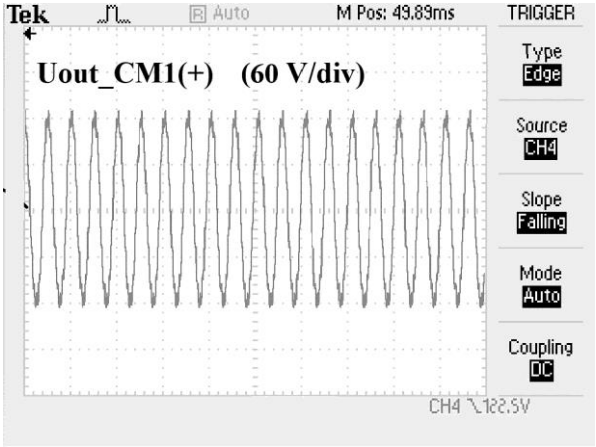



Рис. 7. Осциллограмма напряжения на конденсаторах

На рис. 8 представлена осциллограмма выходного напряжения ППН+ и ППН–.

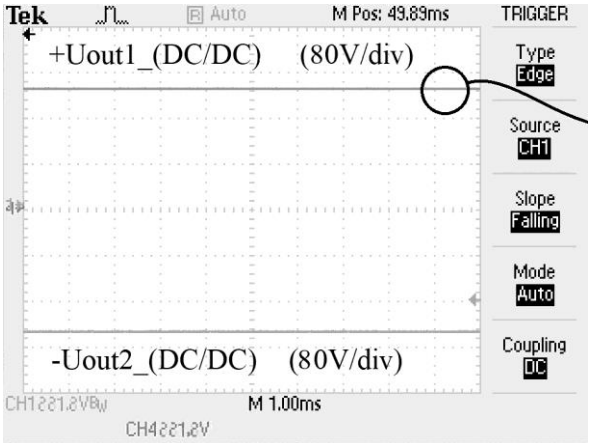



Рис. 8. Осциллограмма выходного напряжения ППН+ и ППН–

Эффект улучшения энергетических показателей при повышении уровня напряжения первичного источника $E_1$ иллюстрируется выражением для КПД силовой цепи преобразователя:

$$\eta = \frac{U_{\text{вых}}}{E_1\,(N+1)} = \frac{K_{\text{п}}}{N+1}, \quad K_{\text{п}} = \frac{U_{\text{вых}}}{E_1}, \qquad (12)$$

где величина $U_{\text{вых}}$ определяется выражением (10).

В схемах с напряжениями первичного источника $E_1$ = 96 В (рис. 2) и $E_1$ = 48–56 В (рис. 3) применены диоды VS-150EBU02 с $E_{VD}$ = 0,68 В и дифференциальным сопротивлением $R_D = 2{,}7\cdot10^{-3}$ Ом.

Для схемы с $E_1$ = 96 В (рис. 2) выходное напряжение и КПД соответственно равны:

$$U_{\text{вых1}} = U_{\text{вых2}} = 184{,}25 \text{ В};$$

$$\eta = \frac{U_{\text{вых1}}}{E_1^{*}\,K_{\text{П}}} = 96\ \%.$$

Для схемы с $E_1$ = 48 В (рис. 3) значения аналогичных показателей равны:

$$U_{\text{вых1}} = U_{\text{вых2}} = 178{,}56 \text{ В};$$

$$\eta = \frac{U_{\text{вых1}}}{E_1^{*}\,K_{\text{П}}} = 92{,}8\ \%.$$

Анализ приведенных выше результатов показывает, что улучшение энергетических и массогабаритных показателей АСЭ достигается за счет ее построения по разнополярной многотактной схеме, показанной на рис. 1.

**Выводы.** Предложенный метод построения многотактных АСЭ, содержащих возобновляемые источники и повышающие DC-DC преобразователи на основе РСПК, позволяет улучшить массогабаритные показатели систем электроснабжения и повысить их энергоэффективность.

Показано, что благодаря повышенному уровню напряжения АБ $E_1$ = ±96–112 В и мягкой коммутации полупроводниковых элементов ППН (РСПК) достигается повышение КПД АСЭ до величины $\eta$ = 96 %.

Применение ППН (РСПК) с разнополярным выходом существенно улучшает его массогабаритные показатели за счет двукратного снижения величины установленной мощности применяемых в нем полупроводниковых элементов, обеспечивающего пропорциональное увеличение частоты преобразования.

### Список литературы

1. **Zotov L.G., Zinoviev G.S., Bolshakov I.M.** Structural Synthesis of Capacitor DC-DC Converters // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – 2022. – P. 467–470. DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855184.

2. **Folmer S., Stala R.** DC-DC High Voltage Gain Switched Capacitor Converter With Multilevel Output Voltage and Zero-Voltage Switching // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 129692–129705. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3111546.

3. **Zotov L.G., Bolshakov I.M.** Optimum Choice of Reactive Elements Parameters for Step-up DC Voltage Capacitor Converter // 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – 2021. – P. 337–342. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507712.

4. **Roy T., Sadhu P.K.** A Step-Up Multilevel Inverter Topology Using Novel Switched Capacitor Converters With Reduced Components // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2021. – Vol. 68, no. 1. – P. 236–247. DOI: 10.1109/TIE.2020.2965458.

5. **Janabi A., Wang B.** Switched-capacitor voltage boost converter for electric and hybrid electric vehicle drives // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2020. – Vol. 35, no. 6. – P. 5615–5624. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2949574.

6. **Improved** Bootstrap Methods for Powering Floating Gate Drivers of Flying Capacitor Multilevel Converters and Hybrid Switched-Capacitor Converters / Z. Ye, Y. Lei, W.-C. Liu, et al. // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2020. – Vol. 35, no. 6. – P. 5965–5977. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2951116.

7. **Xie H., Li R.** A Novel Switched-Capacitor Converter With High Voltage Gain // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 107831–107844. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2931562.

8. **A Switched-Capacitor** DC–DC Converter With Variable Number of Voltage Gains and Fault-Tolerant Operation / R. Stala, Z. Waradzyn, A. Penczek, et al. // IEEE Trans. Ind. Electron, 2019. – Vol. 66, no. 5. – P. 3435–3445. DOI: 10.1109/TIE.2018.2851962.

9. **Nguyen M.-K., Duong T.-D., Lim Y.-C.** Switched-Capacitor-Based Dual-Switch High-Boost DC–DC Converter // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2017. – Vol. 33, no. 5. – P. 4181–4189. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2719040.

10. **Efficiency** analysis of MOSFET-based air-choke resonant DC–DC step-up switched-capacitor voltage multipliers / Z. Waradzyn, R. Stala, A. Mondzik, et al. // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2017. – Vol. 64, no. 11. – P. 8728–8738. DOI: 10.1109/TIE.2017.2698368.

**References**

1. Zotov, L.G., Zinoviev, G.S., Bolshakov, I.M. Structural Synthesis of Capacitor DC-DC Converters. 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 2022, pp. 467–470. DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855184.

2. Folmer, S., Stala, R. DC-DC High Voltage Gain Switched Capacitor Converter With Multilevel Output Voltage and Zero-Voltage Switching. IEEE Access, 2021, vol. 9, pp. 129692–129705. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3111546.

3. Zotov, L.G., Bolshakov, I.M. Optimum Choice of Reactive Elements Parameters for Step-up DC Voltage Capacitor Converter. 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 2021, pp. 337–342. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507712.

4. Roy, T., Sadhu, P.K. A Step-Up Multilevel Inverter Topology Using Novel Switched Capacitor Converters With Reduced Components. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, vol. 68, no. 1, pp. 236–247. DOI: 10.1109/TIE.2020.2965458.

5. Janabi, A., Wang, B. Switched-capacitor voltage boost converter for electric and hybrid electric vehicle drives. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, vol. 35, no. 6, pp. 5615–5624. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2949574.

6. Ye, Z., Lei, Y., Liu, W.-C., Shenoy, P.S., Pilawa-Podgurski, R. Improved Bootstrap Methods for Powering Floating Gate Drivers of Flying Capacitor Multilevel Converters and Hybrid Switched-Capacitor Converters. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, vol. 35, no. 6, pp. 5965–5977. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2951116.

7. Xie, H., Li, R. A Novel Switched-Capacitor Converter With High Voltage Gain. IEEE Access, 2019, vol. 7, pp. 107831–107844. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2931562.

8. Stala, R., Waradzyn, Z., Penczek A., Mondzik, A., Skała, A. A Switched-Capacitor DC–DC Converter With Variable Number of Voltage Gains and Fault-Tolerant Operation. IEEE Trans. Ind. Electron., 2019, vol. 66, no. 5, pp. 3435–3445. DOI: 10.1109/TIE.2018.2851962.

9. Nguyen, M.-K., Duong, T.-D., Lim, Y.-C. Switched-Capacitor-Based Dual-Switch High-Boost DC–DC Converter. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, vol. 33, no. 5, pp. 4181–4189. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2719040.

10. Waradzyn, Z., Stala, R., Mondzik, A., Penczek, A., Skala, A., Pirog, S. Efficiency analysis of MOSFET-based air-choke resonant DC–DC step-up switched-capacitor voltage multipliers. IEEE Trans. Ind. Electron., 2017, vol. 64, no. 11, pp. 8728–8738. DOI: 10.1109/TIE.2017.2698368.

# МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.928

**Владимир Павлович Жуков**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, заведующий кафедрой прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

**Антон Николаевич Беляков**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: ab_pm@mail.ru

**Антон Валерьевич Огурцов**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: ogurtsovav@mail.ru

**Александр Сергеевич Шмелев**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», соискатель кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: shml.alx@gmail.com

**Дмитрий Сергеевич Бараковских**
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кандидат технических наук, доцент кафедры оборудования и автоматизации силикатных производств, Россия, Екатеринбург, e-mail: d.s.barakovskikh@urfu.ru

**Сергей Ильич Шувалов**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: admin@tes.ispu.ru

## Моделирование и оптимизация регулярных многоступенчатых многопродуктовых гравитационных классификаторов

**Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Вопросы переработки сыпучих материалов в энергетике, фармакологии и химической индустрии занимают важное место. Новые технологии зачастую формируют новые требования к гранулометрическим характеристикам отдельных компонентов порошков и их смесям. Часто компоненты смеси различаются по своим свойствам и размерам зерен, в связи с чем для получения порошков с заданными технологическими свойствами требуется многостадийная переработка данных смесей. Оптимальное управление структурой и режимами работы сложных многоступенчатых аппаратов для получения порошков с заданными свойствами является актуальной задачей.
**Материалы и методы.** Для моделирования многоступенчатых гравитационных классификаторов использованы методы теории вероятностей и уравнения фракционных массовых балансов. При решении задач оптимизации классификации порошков применены методы математического программирования.
**Результаты.** Предложена обобщенная методика комбинаторного матричного описания разомкнутой ступени регулярных многопродуктовых классифицирующих элементов для произвольного числа готовых продуктов.

© Жуков В.П., Беляков А.Н., Огурцов А.В., Шмелев А.С., Бараковских Д.С., Шувалов С.И., 2023
Вестник ИГЭУ, 2023, вып. 4, с. 77–84.

Предложенная модель ступени использована для матричного описания замкнутой системы аппаратов с произвольной структурой потоков. Определены наилучшие структуры и режимы работы отдельных ступеней для получения порошков с заданными технологическими свойствами.
**Выводы.** Разработанный подход позволяет оптимально управлять структурой каскада классификаторов и режимами работы его отдельных ступеней для получения порошков с заданными технологическими свойствами, а также строить системы предиктивной диагностики состояния этих установок в энергетической, фармакологической и химической отраслях промышленности.

**Ключевые слова:** фракционный баланс, матричное моделирование, многоступенчатые многопродуктовые классификаторы, гранулометрические характеристики порошков, математическое программирование, предиктивная диагностика

**Vladimir Pavlovich Zhukov**
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Head of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

**Anton Nikolaevich Belyakov**
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: ab_pm@mail.ru

**Anton Valerievich Ogurtsov**
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: ogurtsovav@mail.ru

**Alexander Sergeevich Shmelev**
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: shml.alx@gmail.com

**Dmitry Sergeevich Barakovskikh**
Ural Federal University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Equipment and Automation of Silicate Production Department, Russia, Ekaterinburg, e-mail: d.s.barakovskikh@urfu.ru

**Sergey Ilyich Shuvalov**
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

# Modeling and optimization of regular multi-stage multi-product gravity classifiers

**Abstract**

**Background.** The issues of processing bulk materials are of great importance in the energy, pharmacology, and chemical industries. New technologies have new requirements for the granulometric characteristics of individual components of powders and their mixtures. Often, the components of a mixture differ in their properties and grain sizes, thus, multi-stage processing of these mixtures is required to obtain powders with desired technological properties. Optimal control of the structure and operating modes of complex multi-stage apparatus to obtain powders with desired properties is a topical task.
**Materials and methods.** Methods of probability theory and fractional mass balance equations are used to model multi-stage gravitational classifiers. Mathematical programming methods are applied to solve optimization problems of powder classification.
**Results.** A generalized method of combinatorial matrix description of an open stage of regular multiproduct classifying elements for an arbitrary number of finished products is proposed. The proposed model of the considered stage is used for the matrix description of a closed system of devices with an arbitrary flow structure. The authors have determined the best structures and operating modes of individual stages to obtain powders with specified technological properties.
**Conclusions.** The developed approach makes it possible to optimally control the structure of the cascade of classifiers and the modes of operation of its individual stages to obtain powders with desired technological properties, as well as to design systems for predictive diagnostics of the state of these installations in the energy, pharmacological and chemical industries.

**Key words:** fractional balance, matrix modeling, multistage multiproduct classifiers, granulometric characteristics of powders, mathematical programming, predictive diagnostics

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.4.077-084

**Введение.** Вопросы получения порошков с заданными технологическими свойствами при переработке сыпучих материалов в энергетической и смежных отраслях промышленности занимают важное место [1–9]. Новые технологии зачастую диктуют новые требования к грануло-

метрическим характеристикам отдельных компонентов порошков и их смесям [10–12]. Часто компоненты смеси отличаются по своим свойствам и размерам зерен, в связи с чем для получения порошков с заданными технологическими свойствами требуется многостадийная переработка данных смесей. Оптимальное управление структурой и режимами работы сложных многоступенчатых систем для эффективной наработки требуемых порошков является актуальной задачей [13, 14].

Целью предлагаемого исследования является повышение эффективности функционирования многоступенчатых многопродуктовых классификаторов на основе их математического описания.

В качестве объекта исследования рассматривается процесс многоступенчатой многопродуктовой классификации.

Предметом исследования является разработка модели многопродуктовой гравитационной регулярной классифицирующей системы и решение на ее основе задач повышения эффективности выбора структуры и режимов работы установки.

**Методы и результаты исследования**. Для моделирования многоступенчатых гравитационных классификаторов используются методы матричного описания фракционных балансов [12, 15] и теории вероятностей [16, 17]. При решении оптимизационных задач многопродуктовой классификации порошков применяются методы математического программирования [18, 19].

Схема исследуемой многоступенчатой многопродуктовой регулярной гравитационной классифицирующей установки представлена на рис. 1.

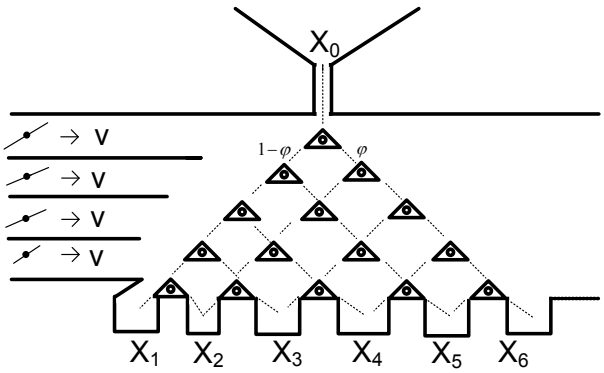



Рис. 1. Схема регулярной многоступенчатой многопродуктовой гравитационной классифицирующей установки

Исходный продукт с известным гранулометрическим составом $\mathbf{X}_0$ подается на вход установки. Взаимодействуя с классифицирующим элементом ступени, показанным на рис. 1 треугольником, частица может направляться (отскакивать) в левую или правую сторону. Каждый горизонтальный ряд элементов или выделенная их совокупность условно считается ступенью классификатора. Готовые продукты разделения собираются в бункеры, которые расположены в нижней части установки. Классификатор называется многопродуктовым [14], так как число готовых продуктов в общем случае больше двух. Классификатор называется регулярным, так как классифицирующие элементы расположены регулярными упорядоченными рядами с увеличивающимся числом элементов в каждом ряду. В левой части рис. 1 стрелками показана скорость подаваемого для сортировки частиц воздуха, которая на начальном этапе исследований принимается равной нулю.

Задача моделирования многоступенчатой многопродуктовой классифицирующей установки решается в два этапа:

- на первом этапе рассматривается задача по определению кривых разделения продуктов и гранулометрических составов готовых порошков регулярных разомкнутых каскадов, имеющих k продуктов на выходе, при однократном прохождении порошка через установку, при этом несколько горизонтальных рядов классифицирующих элементов, согласно схемам, приведенным в таблице, объединяются при моделировании в один многопродуктовый классификатор;
- на втором этапе строится модель замкнутой системы произвольной структуры, состоящей из рассмотренных на первом этапе многопродуктовых классификаторов, с учетом возможной рециркуляции промежуточных продуктов для определения гранулометрических составов порошков и массопотоков в любой точке классифицирующей системы.

На первом этапе анализируются эквивалентные схемы классификаторов, представленные в таблице: а) двухпродуктового; б) трехпродуктового; в) четырехпродуктового; г) пятипродуктового; д) шестипродуктового.

Считается, что на каждом классифицирующем элементе, показанном на рис. 1 треугольником, частицы наблюдаемого размера $\delta$ после взаимодействия с элементом ступени могут с вероятностью $\varphi(\delta)$ отскакивать от элемента в правую сторону и с вероятностью $(1 - \varphi(\delta))$ – в левую сторону, где $\varphi(\delta)$ – кривая разделения каждого элемента ступени, значение которой показывает вероятность отскока частицы данного размера в правую сторону [14]. При проведении расчетного анализа кривые разделения каждого элемента представлены двумя вариантами зависимостей:

– линейной

$$\varphi(\delta) = 1 - \delta / (2\delta_{гр})$$

или

– S-образной кривой (1) [13, 14]

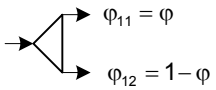
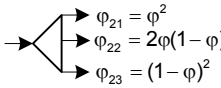
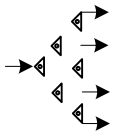
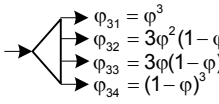
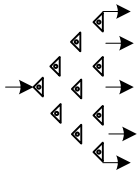
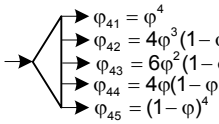
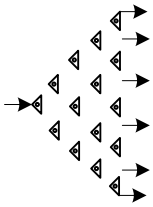
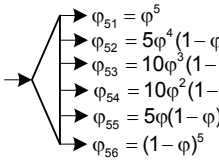
$$\varphi(\delta) = \frac{1}{1 + \left(\delta / \delta_{гр}\right)^{k_s}}, \qquad (1)$$

где $\delta_{гр}$ – граничный размер частиц, для которых $\varphi(\delta_{гр})$ = 0,5; $k_s$ – параметр совершенства процесса сепарации.

В качестве недостатков представленных зависимостей следует отметить, что параметры $k_s$ и $\delta_{гр}$ должны определяться экспериментальным путем или в ходе идентификации модели по экспериментальным данным.

В нижней части установки (рис. 1) расположены бункеры готовых продуктов, в которые попадают частицы при достижении нижней границы установки. Зависимость вероятности попадания частиц в *i*-й бункер от размера $\delta$ будем называть кривой разделения продукта и обозначать $\varphi_{ij}(\delta)$, где индекс *i* показывает число продуктов разделения рассматриваемого каскада минус один ($i = k - 1$), а индекс *j* соответствует номеру продукта разделения данного каскада.

**Фрагмент схемы, ее код, эквивалентная схема и модель многопродуктовых классификаторов**

| Код схемы | Число продуктов *k* | Фрагмент схемы рис. 1 | Эквивалентная схема многопродуктового классификатора и его модель |
|---|---|---|---|
| а) | 2 | |  $\varphi_{11} = \varphi$<br>$\varphi_{12} = 1-\varphi$ |
| б) | 3 | |  $\varphi_{21} = \varphi^2$<br>$\varphi_{22} = 2\varphi(1-\varphi)$<br>$\varphi_{23} = (1-\varphi)^2$ |
| в) | 4 |  |  $\varphi_{31} = \varphi^3$<br>$\varphi_{32} = 3\varphi^2(1-\varphi)$<br>$\varphi_{33} = 3\varphi(1-\varphi)^2$<br>$\varphi_{34} = (1-\varphi)^3$ |
| г) | 5 |  |  $\varphi_{41} = \varphi^4$<br>$\varphi_{42} = 4\varphi^3(1-\varphi)$<br>$\varphi_{43} = 6\varphi^2(1-\varphi)^2$<br>$\varphi_{44} = 4\varphi(1-\varphi)^3$<br>$\varphi_{45} = (1-\varphi)^4$ |
| д) | 6 |  |  $\varphi_{51} = \varphi^5$<br>$\varphi_{52} = 5\varphi^4(1-\varphi)$<br>$\varphi_{53} = 10\varphi^3(1-\varphi)^2$<br>$\varphi_{54} = 10\varphi^2(1-\varphi)^3$<br>$\varphi_{55} = 5\varphi(1-\varphi)^4$<br>$\varphi_{56} = (1-\varphi)^5$ |

На первом этапе целью моделирования является определение кривых разделения продуктов $\varphi_{ij}(\delta)$ и гранулометрических составов порошков в каждом продукте при однократном прохождении порошка через разомкнутую установку при известных кривых разделения отдельных элементов $\varphi(\delta)$. Для этого фрагмент регулярного каскада, представленного на рис. 1, заменяется эквивалентным многопродуктовым классификатором с одним входом и *k* выходами согласно схемам, представленным в таблице.

Считается, что совокупность событий попадания частицы в один из нижних бункеров образует полную группу событий, суммарная вероятность которых равна единице [17]. При построении модели двухпродуктового классификатора (см. таблицу, код а)) определяются две вероятности попадания частиц в первый и второй продукты:

$$\begin{aligned} &\varphi_{11} = \varphi, \\ &\varphi_{12} = 1-\varphi, \end{aligned} \tag{2}$$

где $\varphi(\delta)$ – вероятность отскока частицы размером $\delta$ в правую сторону (первый продукт).

При построении модели трехпродуктового классификатора (см. таблицу, код б)) определяются три вероятности попадания частиц в первый (правый), второй (средний) и третий (левый) продукты. Согласно теореме умножения вероятностей двух независимых событий [17], указанные вероятности записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned} &\varphi_{21} = \varphi^2, \\ &\varphi_{22} = 2\varphi(1-\varphi), \\ &\varphi_{23} = (1-\varphi)^2. \end{aligned} \tag{3}$$

Модели для четырех-, пяти- и шестипродуктовых классификаторов (см. таблицу, код в), г), д) соответственно) строятся аналогичным образом согласно теореме умножения вероятностей независимых событий [17] и также приводятся в таблице для каждого продукта классификатора в виде кривых разделения продуктов.

Общий случай модели регулярного гравитационного *k*-продуктового классификатора в виде зависимости для кривых разделения продуктов записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} &\varphi_{ij} = C_i^j \varphi^{k-j}(1-\varphi)^{j-1}, \\ &i = k-1, \\ &j = \overline{1,k}, \end{aligned} \tag{4}$$

где $C_i^j = \dfrac{i!}{j!(i-j)!}$ – число сочетаний из *j* элементов, которые принадлежат множеству из *i* элементов [17].

Полученные зависимости кривых разделения продуктов, которые показывают вероятность попадания частиц в каждый продукт, при известной кривой разделения отдельного элемента и при известном гранулометрическом составе исходного порошка на входе позволяют рассчитать [14] гранулометрические составы для каждого продукта следующим образом:

$$X_{ij}(\delta) = X_0(\delta)\varphi_{ij}(\delta), \tag{5}$$

где $X_0(\delta)$ – дифференциальная функция распределения частиц по размерам в исходном продукте; $X_{ij}(\delta)$ – дифференциальная функция распределения частиц по размерам в готовом продукте с кривой разделения продукта $\varphi_{ij}(\delta)$.

Результаты расчетов, выполненных согласно приведенным моделям (4)–(5) для ступени многопродуктовых разомкнутых классификаторов, представлены на рис. 2–4.

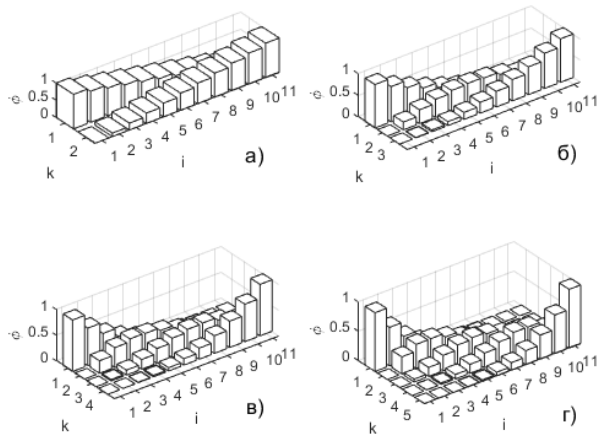



Рис. 2. Кривые разделения продуктов двух- (а), трех- (б), четырех- (в) и пяти- (г) продуктового классификатора при линейной кривой разделения каждого элемента: *k* – номер продукта; *i* – номер фракции

Зависимости, представленные на рис. 2, показывают вид кривых разделения продуктов в двух- (а), трех- (б), четырех- (в) и пяти- (г) продуктовых классификаторах при числе фракций крупности $N$ = 11. Анализ результатов показывает, что в первый продукт преимущественно выделяются мелкие, в последний продукт – крупные частицы. В промежуточные продукты попадают частицы средних фракций, от которых отделяется часть мелких и крупных частиц.

Результаты расчетов кривых разделения пяти продуктов при числе анализируемых фракций $N$ = 100 для линейной кривой разделения элемента пятипродуктового классификатора представлены на рис. 3.

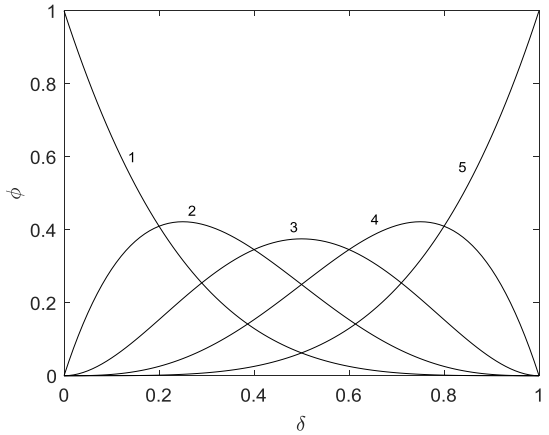



Рис. 3. Кривые разделения продуктов пятипродуктового классификатора при линейной кривой разделения элемента ($\delta_{гр}$ = 0,5): 1 – первый; 2 – второй; 3 – третий; 4 – четвертый; 5 – пятый продукт

Разные продукты содержат частицы с различной крупностью, и предлагаемая модель позволяет оценить извлечение в каждый продукт частиц наблюдаемого размера с точки зрения возможности его дальнейшего использования в технологии в качестве промежуточного или целевого продукта.

На рис. 4 приведены кривые разделения пяти продуктов при нелинейной кривой разделения (1) ($k_s$ = 1; $\delta_{гр}$ = 0,5) для пятипродуктового классификатора.

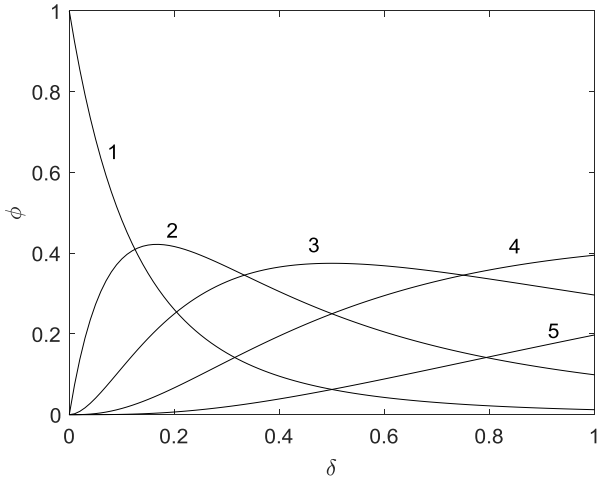



Рис. 4. Кривые разделения продуктов пятипродуктового классификатора при нелинейной кривой разделения элемента ($k_s$ = 1; $\delta_{гр}$ = 0,5): 1 – первый; 2 – второй; 3 – третий; 4 – четвертый; 5 – пятый продукт

Сравнение результатов расчета, представленных на рис. 3, 4, позволяет оценить влияние вида кривых разделения элемента ступени на вид кривых разделения продуктов.

На втором этапе исследований рассматривается модель замкнутого многопродуктового каскада, которая описывает преобразование гранулометрического состава порошков при многоступенчатой организации процесса, при этом любой продукт или его часть могут подаваться на вход любой другой ступени системы.

На рис. 5 показан наиболее общий вариант структуры многопродуктовой многоступенчатой классифицирующей системы, состоящей из *n* ступеней. Данная структура предполагает, что возможна коммутация любых выходных потоков ступени с входом любой другой ступени классификации. На рис. 5 для демонстрации вывода расчетных соотношений модели схематично показано формирование потока на входе в *i*-ю ступень установки, более подробно представлена связь между первой и *i*-й ступенью. Так, на вход в первый элемент подается порошок, который характеризуется гранулометрическим составом $[\mathbf{X}_0]_1$. Индекс «0» внутри квадратных скобок указывает на входные параметры, индекс «1» за квадратными скобками относится к номеру ступени. Процесс классификации для продукта описывается кривой

разделения этого продукта, представленной диагональной матрицей $\mathbf{C_1}$, которая при линейной постановке задачи позволяет определить выходные параметры первой ступени через произведение $\mathbf{C}_1[\mathbf{X}^0]_1$. Вид кривой разделения продукта и соответствующей матрицы **C** для описания классификации для каждого продукта ступени представлен в таблице. Для указания направления движения потоков после ступени формируется матрица коммутации $\mathbf{K_{i1}}$, элементы которой показывают доли потоков фракций, подаваемых из первой ступени в *i*-ю. При этом матричное произведение $\mathbf{K_{i1}}\ \mathbf{C}_1\ [\mathbf{X}^0]_1$ определяет параметры фракционных потоков, подаваемых из первой ступени в *i*-ю. Очевидно, что на вход в *i*-ю ступень могут подаваться потоки не только из первой ступени, но и из остальных ступеней системы и внешние для системы потоки. Перечисленные потоки условно показаны в прямоугольнике в верхней части расчетной схемы на рис. 5. Входной вектор признаков для *i*-й ступени определится суммой значений аддитивных параметров смешиваемых на его входе потоков в узле смешения, отмеченном на рис. 5 точкой:

$$[\mathbf{X}_0]_i = \mathbf{K}_{i1}\mathbf{C}_1[\mathbf{X}_0]_1 + \mathbf{K}_{i2}\mathbf{C}_2[\mathbf{X}_0]_2 + \ldots + \mathbf{K}_{in}\mathbf{C}_n[\mathbf{X}_0]_n + [\mathbf{X}_{вх}]_i, \quad (6)$$

где индекс «вх» указывает на внешний поток, подаваемый на вход ступени.

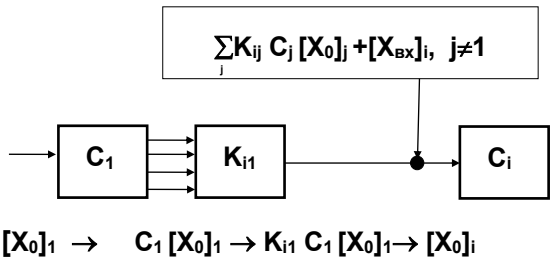



Рис. 5. Расчетная схема формирования параметров потока на входе в *i*-й элемент многопоточной многоступенчатой классифицирующей установки

Уравнения, аналогичные (6), записываются для каждой из *n* ступеней установки. Полученная при этом система уравнений после преобразований представляется в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{K_{11}C_1 - I} & \mathbf{K_{12}C_2} & \cdots & \mathbf{K_{1n}C_n} \\ \mathbf{K_{21}C_1} & \mathbf{K_{22}C_2 - I} & \cdots & \mathbf{K_{2n}C_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{K_{n1}C_1} & \mathbf{K_{n2}C_2} & \cdots & \mathbf{K_{nn}C_n - I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [\mathbf{X_0}]_1 \\ [\mathbf{X_0}]_2 \\ \ldots \\ [\mathbf{X_0}]_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -[\mathbf{X_{вх}}]_1 \\ -[\mathbf{X_{вх}}]_2 \\ \ldots \\ -[\mathbf{X_{вх}}]_n \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где **I** – единичная матрица.

При известных матрицах **C** и **K** решение системы (7) позволяет определить фракционный состав порошка в любой точке системы.

В качестве тестового примера для демонстрации возможностей практического использования модели (7) рассматривается задача увеличения наработки целевого продукта в замкнутой системе с пятипродуктовым классификатором. При получении шлифовальных порошков или качественных красителей в готовом продукте нормируется присутствие мелких и крупных частиц, а целевой является фракция без мелких и крупных частиц. Выделение нецелевых продуктов и возможное их направление на повторную перечистку является скрытым резервом увеличения выхода целевого продукта. Для решения задачи повышения содержания товарной фракции рассматривается пятипродуктовый классификатор (см. таблицу, код г)), у которого промежуточные нетоварные продукты замыкаются на вход классификатора согласно схеме потоков на рис. 6. В качестве целевой функции эффективности рассматривается доля выхода третьего продукта или товарной фракции при организации рециркуляции второго и четвертого продуктов, которые содержат преимущественно нетоварные частицы. Структура потоков в многоступенчатой установке задается матрицей коммутации $\mathbf{K}_{ij}$, размер которой определяется числом входных и выходных потоков ступеней. При проведении тестовых расчетов гранулометрический состав описывается содержанием ста узких фракций ($N$ = 100). Размер матрицы коммутации для рассматриваемой системы равен $N \times 5N$ элементов.

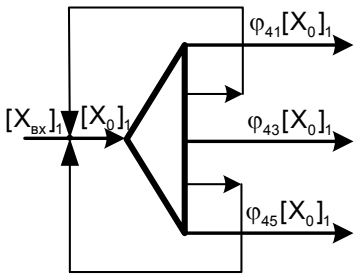



Рис. 6. Схема рециркуляции второго и четвертого нецелевых продуктов на вход пятипродуктового классификатора

Результаты расчетного анализа, выполненного согласно модели (6), приведены на рис. 7 в виде кривых разделения конечных продуктов для пятипродуктового классификатора при нелинейной кривой разделения ступени с рециркуляцией нецелевых продуктов на вход установки. Формулы для расчета гранулометрических составов выходных для системы продуктов приведены на рис. 7. Расчетный анализ показал, что при равномерном распределении частиц по крупности в исходном материале организация рециркуляции потоков позволила увеличить выход товарной фракции (рис. 7, кривая 2) с 29,78 до 58,27 %.

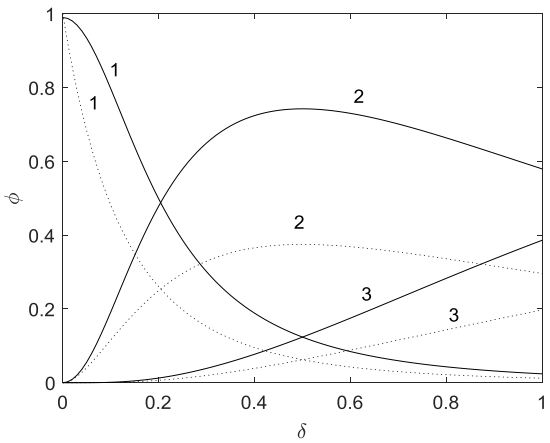



Рис. 7. Кривые разделения продуктов пятипродуктового классификатора при нелинейной кривой разделения ступени ($k_s$ = 1; $\delta_{гр}$ = 0,5) в разомкнутой (пунктирная линия) и замкнутой (сплошная линия) системе: 1 – первый; 2 – третий; 3 – пятый продукт

**Выводы.** Разработанная обобщенная методика комбинаторного матричного описания ступени регулярных каскадов для произвольного числа готовых продуктов и предложенная модель ступени использованы для матричного описания замкнутой системы аппаратов с произвольной структурой потоков. Повышение эффективности системы регулярных каскадов для пятипродуктового классификатора за счет организации рециркуляции нецелевых продуктов позволяет увеличить выход целевого продукта с 29,78 до 58,27 %.

Разработанный подход позволяет ставить и решать задачи оптимального управления структурой каскада классификаторов и режимами работы его отдельных ступеней для получения порошков с заданными технологическими свойствами, а также строить системы предиктивной аналитики состояния этих установок в энергетической, фармакологической и химической отраслях промышленности. Дальнейшее развитие исследований планируется в направлении учета дополнительного управления процессом классификации за счет варьирования скорости воздуха в каждой ступени, что позволит обеспечить более тонкое регулирование технологических параметров готовых продуктов.

### Список литературы

1. **Ревнивцев В.И**. Селективное разрушение минералов. – М.: Недра, 1988. – 286 с.

2. **Андреев С.Е.** Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1980. – 416 с.

3. **Фоменко Т.Г., Бутовецкий В.С., Погарцева Е.М.** Технология обогащения углей: справочное пособие. – М.: Недра, 1985. – 367 с.

4. **Сиденко П.М.** Измельчение в химической промышленности. – М.: Химия, 1977. – 368 с.

5. **Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю.** Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешивания сыпучих материалов. – М.: Наука, 1985. – 440 с.

6. **Линч А.** Циклы дробления и измельчения. – М.: Недра, 1980. – 343 с.

7. **Ходаков Г.С.** Физика измельчения. – М.: Наука, 1972. – 308 с.

8. **Дуда В.** Цемент. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.

9. **Справочник** по обогащению руд. Подготовительные процессы / под ред. О.С. Богданова. – М.: Недра, 1982. – 368 с.

10. **Жуков В.П., Каталымов А.В., Мизонов В.Е.** Расчетно-экспериментальное исследование разделения разнопрочных материалов в совмещенном распределенном процессе дробления классификации // Теоретические основы химической технологии. – 1997. – Т. 31, № 3. – С. 333–335.

11. **Беляков А.Н., Жуков В.П., Otwinowski H., Urbaniak D.** Описание процессов измельчения и классификации сыпучих материалов на основе уравнения Больцмана // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 1. – С. 108–110.

12. **Mizonov V., Zhukov V., Bernotat S.** Simulation of Grinding: New Approaches. – Ivanovo, 1997. – 108 p.

13. **Барский М.Д., Ревнивцев В.И., Соколкин Ю.В.** Гравитационная классификация зернистых материалов. – М.: Недра, 1974. – 232 с.

14. **Мизонов В.Е., Ушаков С.Г.** Аэродинамическая классификация порошков. – М.: Химия, 1989. – 160 с.

15. **Жуков В.П., Барочкин Е.В.** Системный анализ энергетических тепломассообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.

16. **Вентцель Е.С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004. – 207 с.

17. **Гмурман В.Е.** Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Высш. шк., 1970. – 239 с.

18. **Карманов В.Г.** Математическое программирование. – М.: Физматлит, 2004. – 264 с.

19. **Власов В.Г.** Конспект лекций по высшей математике. – М.: Айрис, 1996. – 287 с.

### References

1. Revnivtsev, V.I. *Selektivnoe razrushenie mineralov* [Selective destruction of mines]. Moscow: Nedra, 1988. 286 p.

2. Andreev, S.E. *Droblenie, izmel'chenie i grokhochenie poleznykh iskopaemykh* [Crushing, grinding and screening of minerals]. Moscow: Nedra, 1980. 416 p.

3. Fomenko, T.G., Butovetskiy, V.S., Pogartseva, E.M. *Tekhnologiya obogashcheniya ugley: Spravochnoe posobie* [Technology of coal enrichment: A reference manua]. Moscow: Nedra, 1985. 367 p.

4. Sidenko, P.M. *Izmel'chenie v khimicheskoy promyshlennosti* [Grinding in the chemical industry]. Moscow: Khimiya, 1977. 368 p.

5. Kafarov, V.V., Dorokhov, I.N., Arutyunov, S.Yu. *Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii. Protsessy izmel'cheniya i smeshivaniya sypuchikh materialov* [System analysis of chemical technology process-

es. The processes of grinding and mixing of bulk materials]. Moscow: Nauka, 1985. 440 p.

6. Linch, A. *Tsikly drobleniya i izmel'cheniya* [Cycles of crushing and grinding]. Moscow: Nedra, 1980. 343 p.

7. Khodakov, G.S. *Fizika izmel'cheniya* [Physics of grinding]. Moscow: Nauka, 1972. 308 p.

8. Duda, V. *Tsement* [Cement]. Moscow: Stroyizdat, 1981. 464 p.

9. Bogdanova, O.S. (red.). *Spravochnik po obogashcheniyu rud. Podgotovitel'nye protsessy* [Handbook of ore dressing. Preparatory processes]. Moscow: Nedra, 1982. 368 p.

10. Zhukov, V.P., Katalymov, A.V., Mizonov, V.E. Raschetno-eksperimental'noe issledovanie razdeleniya raznoprochnykh materialov v sovmeshchennom raspredelennom protsesse drobleniya klassifikatsii [Computational and experimental study of the separation of high-strength materials in a combined distributed crushing process]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 1997, vol. 31, no. 3, pp. 333–335.

11. Belyakov, A.N., Zhukov, V.P., Otwinowski, H., Urbaniak, D. Opisanie protsessov izmel'cheniya i klassifikatsii sypuchikh materialov na osnove uravneniya Bol'tsmana [Description of the processes of grinding and classification of bulk materials based on the Boltzmann equation]. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 1, pp. 108–110.

12. Mizonov, V., Zhukov, V., Bernotat, S. Simulation of Grinding: New Approaches. Ivanovo, 1997. 108 p.

13. Barskiy, M.D., Revnivtsev, V.I., Sokolkin, Yu.V. *Gravitatsionnaya klassifikatsiya zernistykh materialov* [Grading classification of granular materials]. Moscow: Nedra, 1974. 232 p.

14. Mizonov, V.E., Ushakov, S.G. *Aerodinamicheskaya klassifikatsiya poroshkov* [Aerodynamic classification of powders]. Moscow: Khimiya, 1989. 160 p.

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

16. Venttsel', E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations research: tasks, principles, methodology]. Moscow: Drofa, 2004. 207 p.

17. Gmurman, V.E. *Rukovodstvo k resheniyu zadach po teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistike* [A guide to solving problems in probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1970. 239 p.

18. Karmanov, V.G. *Matematicheskoe programmirovanie* [Mathematical programming]. Moscow: Fizmatlit, 2004. 264 p.

19. Vlasov, V.G. *Konspekt lektsiy po vysshey matematike* [Lecture notes on higher mathematics]. Moscow: Ayris, 1996. 287 p.

УДК 621.165

**Кирилл Николаевич Бубнов**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: kirill.bubnov.96@mail.ru

**Владимир Павлович Жуков**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой прикладной математики, адрес: Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

**Антон Владимирович Голубев**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой систем управления, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-57, e-mail: gol-ant@su.ispu.ru

**Евгений Витальевич Барочкин**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: bar@ivenser.com

**Сергей Ильич Шувалов**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: admin@tes.ispu.ru

# Система непрерывного мониторинга технического состояния и оперативной диагностики паровой турбины

**Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Во время работы энергетического оборудования происходит его износ, который становится причиной снижения надежности и эффективности, неплановых остановов и аварий. На данный момент одним из перспективных направлений, позволяющих контролировать и анализировать техническое состояние энергетического оборудования, является предиктивная аналитика. В рамках предиктивной аналитики последовательно решаются задачи локализации отклонений технологических параметров и идентификации аномалий в эксплуатации энергетического оборудования. Эти задачи решаются путем статистического моделирования и с помощью методов классификации на основании группы известных прецедентов соответственно. Однако локализация отклонений и идентификация аномалий, имеющих медленнотекущий характер, для паровых турбин является сложной задачей. В связи с этим заслуживает внимания разработка метода непрерывного мониторинга технического состояния и оперативной диагностики на основе математической модели расходной характеристики отдельных отсеков паровой турбины, позволяющей учесть влияние изменения проходного сечения отсеков турбины на распределение давления по проточной части.
**Материалы и методы.** В рамках методологии матричной формализации в разработанной модели паровой турбины система линейных и нелинейных уравнений решается методами вычислительной математики. Решение оптимизационных задач диагностики состояния проточной части осуществляется методами математического программирования.
**Результаты.** Разработаны математическая модель теплофикационной паровой турбины Т-250/305-23.5-ДБ и метод непрерывного мониторинга технического состояния и оперативной диагностики паровой турбины, отличающийся возможностью локализации отклонения и идентификации аномалии путем восстановления по распределению давления по проточной части проходных сечений отсеков парой турбины.
**Выводы.** По результатам статистического анализа разработанная математическая модель теплофикационной паровой турбины Т-250/305-23.5-ДБ признана адекватной, а метод непрерывного мониторинга технического состояния и оперативной диагностики паровой турбины продемонстрировал непротиворечивость получаемых результатов и пригодность для решения задач диагностики на практике. Разработанные модель и метод могут быть использованы в качестве модуля при разработке программного комплекса предиктивной аналитики энергетического оборудования.

**Ключевые слова:** теплофикационная паровая турбина, диагностика паровой турбины, метод непрерывного мониторинга, математическая модель расходной характеристики отсеков паровой турбины, предиктивная аналитика

© Бубнов К.Н., Жуков В.П., Голубев А.В., Барочкин Е.В., Шувалов С.И., 2023
Вестник ИГЭУ, 2023, вып. 4, с. 85–93.

**Kirill Nikolaevich Bubnov**
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: kirill.bubnov.96@mail.ru

**Vladimir Pavlovich Zhukov**
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

**Anton Vladimirovich Golubev**
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Head of Control Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-57, e-mail: gol-ant@yandex.ru

**Evgeniy Vitalievich Barochkin**
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: bar@ivenser.com

**Sergey Ilyich Shuvalov**
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

# System for continuous monitoring of technical condition and maintenance diagnostics of steam turbine

**Abstract**

**Background.** Power equipment deterioration occurs during operation, it causes loss in reliability and efficiency, unscheduled shutdowns, and accidents. Now predictive analytics is one of the promising directions in the field of power engineering which allows to control and analyze the technical condition of power equipment. The problems of localization of deviation of technological parameters and detection of anomaly in the operation of power equipment are consistently solved in the framework of predictive analytics. The problems of deviations localization and anomalies detection are solved by the methods of statistical modeling and the classification algorithms respectively. However, for steam turbines the localization of deviation and the detection of anomalies having slow-flowing character are a difficult problem. Therefore, the issue of development of a method for continuous monitoring of technical condition and maintenance diagnostics based on a mathematical model of the steam turbine section flow characteristics is worth noticing. The method allows us to consider the effect of changes in the open flow area of the individual sections of a steam turbine on the pressure distribution over the steam flow path.
**Materials and methods.** The model of a steam turbine has been developed within the matrix formalization methodology. The solution of the system of linear and nonlinear equations is carried out by methods of computational mathematics. The solution of the optimization problems of the steam flow path diagnostics is carried out by methods of mathematical programming.
**Results.** A mathematical model of the cogeneration steam turbine T-250/305-23.5-DB and a method for continuous condition monitoring and maintenance diagnostics of steam turbine have been developed. It allows us to localize deviation and detect anomaly by recovery of the open flow area of the individual sections of a steam turbine based on the pressure distribution over the steam flow path.
**Conclusions.** The results of the statistical analysis prove that a mathematical model of the cogeneration steam turbine T-250/305-23.5-DB has been recognized adequate. The method for continuous condition monitoring and maintenance diagnostics of steam turbine has demonstrated consistency of the obtained results and ability to solve diagnostic problems in practice. The developed model and method can be used as a module in the development of a software package for predictive analytics of power equipment.

**Key words:** cogeneration steam turbine, steam turbine diagnostics, continuous monitoring method, mathematical model of flow characteristics of steam turbine compartments, predictive analytics

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.4.085-093

**Введение.** Во время работы энергетического оборудования происходит его износ, который приводит не только к снижению надежности и эффективности, но и к неплановым остановам и аварийным ситуациям. В ходе эксплуатации паротурбинной установки (ПТУ), представляющей совокупность функциональных узлов и систем, а также вспомогательного оборудования техническое состояние непосредственно паровой турбины ухудшается вследствие низкого качества ремонта и монтажа, длительной эксплуатации деталей, несоблюдения обслуживающим персоналом электростанции требований нормативных документов и т.д. [1]. Кроме того, причинами снижения эффективности и надежности паровой турбины, а также ухудшения характеристик маневренности, как указывают результаты прямых и косвенных испытаний, являются медленнотекущие процессы эрозионно-абразивного износа [2–4] и образования отложения солей и окислов [5, 6], выявление которых на ранних стадиях является сложной задачей.

В течение эксплуатации энергетического оборудования обслуживающий персонал контролирует и поддерживает техническое состояние оборудования путем оперативного диагностирования (например, контроль за эксплуатационными

показателями, вибрационным состоянием ротора, тепловыми расширениями цилиндров и т.д.) и диагностирования при ремонтах и регламентных проверках (например, внешний и внутренний осмотр, контроль линейных размеров, количественный и качественный анализ рабочих жидкостей вспомогательных систем, тепловые испытания [7] и т.д.) [8]. Ухудшение технического состояния ПТУ, в частности элементов проточной части паровой турбины, в процессе эксплуатации фиксируется путем систематического анализа возникшего несоответствия между значениями номинальных (нормативных) и фактических показателей, например экономичности паровой турбины[2]. Как правило, основным источником данных для этого выступают результаты экспресс-испытаний, проводимых один раз в 3–4 месяца[3].

Для повышения эффективности обслуживания энергетического оборудования существуют системы и методы диагностики отдельных элементов, узлов и систем паровой турбины, например: проточной части [9–13]; системы тепловых расширений цилиндров турбины [14, 15]; валопровода турбоагрегата [16]; системы автоматического регулирования турбины [17, 18] и т.п. Эти методы диагностики различаются подходами к вопросу выбора контролируемых параметров и факторов, оказывающих непосредственное воздействие на техническое состояние отдельных функциональных узлов и систем, а также турбины в целом [10, 19, 20]. В свою очередь, диагностика проточной части паровой турбины осуществляется на основании расчета КПД отсеков паровой турбины, работающих на перегретом паре [9, 10], сигналов, получаемых от индукционных датчиков, устанавливаемых в проточной части над рабочими лопатками [11, 12], и результатов оптического контроля [13].

На данный момент одним из перспективных направлений развития обслуживания энергетического оборудования в топливно-энергетическом комплексе является предиктивная аналитика. Суть предиктивной аналитики заключается в интеллектуальном анализе данных, получаемых от контрольно-измерительных приборов и характеризующих техническое состояние оборудования, в целях обнаружения отклонений в эксплуатации оборудования с последующей их локализацией, идентификацией аномалий и выдачей прогноза по времени и соответствующих рекомендаций обслуживающему персоналу по их устранению [21–23].

В рамках предиктивной аналитики последовательно решаются задачи локализации отклонений технологических параметров и идентификации аномалий в эксплуатации энергетического оборудования. Задачи локализации отклонений и идентификации аномалий решаются путем статистического моделирования и с помощью методов классификации на основании группы известных прецедентов соответственно [22, 23].

Однако локализовать отклонения и произвести идентификацию аномалий, имеющих медленнотекущий характер, для паровых турбин является сложной задачей. В связи с этим заслуживает внимания разработка метода непрерывного мониторинга технического состояния и оперативной диагностики на основе математической модели расходной характеристики отдельных отсеков паровой турбины, позволяющей учесть влияние изменения проходного сечения отсеков турбины на распределение давления по проточной части.

Объектом данного исследования является теплофикационная паровая турбина Т-250/305-23.5-ДБ. Предмет исследования – непрерывный мониторинг технического состояния и оперативная диагностика паровой турбины. Целью исследования является разработка системы непрерывного мониторинга технического состояния и оперативной диагностики паровой турбины по показаниям штатных контрольно-измерительных приборов.

**Методы исследования.** Ранее [24] для моделирования режимов работы паровой турбины (ПТУ К-300-240 ЛМЗ) была разработана матричная математическая модель и продемонстрирована ее адекватность. С помощью данной модели было осуществлено моделирование абразивного износа и заноса солями и окислами проходного сечения проточной части отдельных отсеков паровой турбины. Результаты численного моделирования [24] показали значимое изменение распределения давления по проточной части паровой турбины.

В целях разработки системы непрерывного мониторинга технического состояния и оперативной диагностики на основе математической модели расходных характеристик отсеков паровой турбины была выбрана теплофикационная паровая турбина Т-250/305-23.5-ДБ, общий вид принципиальной тепловой схемы которой представлен на рис. 1.

Согласно единой методологии матричной формализации [25], математическая модель турбины Т-250/305-23.5-ДБ представляет собой совокупность линейных (уравнения материального и энергетического балансов) и нелинейных (зависимость Стодолы-Флюгеля) уравнений. Решение получившейся системы линейных и нелинейных уравнений выполняется методом итераций согласно предложенному ранее алгоритму [24].

[2] РД 34.20.581-96. Методика оценки технического состояния паротурбинных установок до и после ремонта и в период между ремонтами: разраб. АО «Фирма ОРГРЭС»: утв. РАО «ЕЭС России» 30.12.1996: ввод в действие с 01.01.1998 г.

[3] РД 153-34.1-30.311-96 (СО 34.30.311-96). Методические указания по проведению экспресс-испытаний паровых турбин ТЭС: разраб. АО «Фирма ОРГРЭС»: утв. РАО «ЕЭС России» 30.12.1996: ввод в действие с 01.08.2001 г.

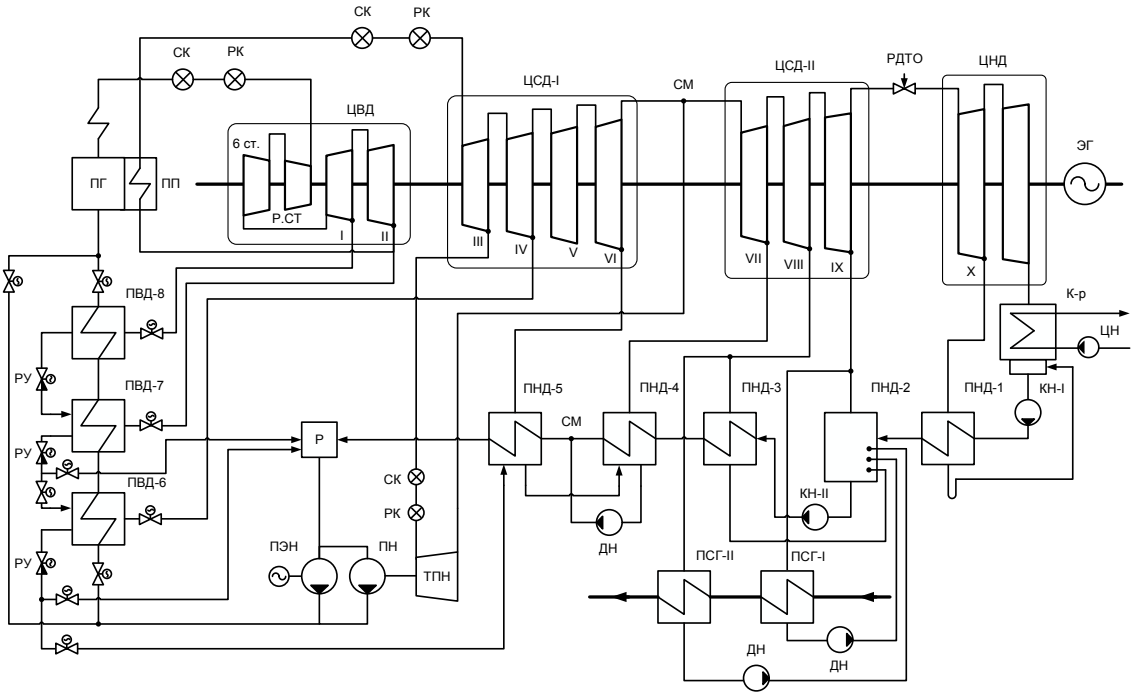



Рис. 1. Общий вид принципиальной тепловой схемы теплофикационной ПТУ Т-250/305-23.5-ДБ: ПК – паровой котел; ПП – пароперегреватель; СК – стопорный клапан; РК – регулирующий клапан; Р.СТ – регулирующая ступень; ЦВД, ЦСД-I, II и ЦНД – цилиндры высокого, среднего и низкого давлений; ЭГ – электрогенератор; К-р – конденсатор; ЦН – циркуляционный насос; КН-I и II – конденсатные насосы первой и второй ступеней; Р – расширитель; ТПН – турбопривод питательного насоса; ПН – питательный насос; ПЭН – питательный электронасос; ПВД – подогреватель высокого давления; РУ – регулятор уровня конденсата греющего пара; ПНД – подогреватель низкого давления; ДН – дренажный насос; РДТО – регулятор давления теплофикационного отбора; ПСГ-I и II – сетевые подогреватели первой и второй ступеней

В задачах диагностики, связанных с распознаванием технического состояния объекта, удобно описать данное состояние вектором в $N$-мерном пространстве признаков:

$$X = \{x_1; x_2; ...; x_n; ...; x_N\}, \quad (1)$$

где $x_n$ $(n = 1 \div N)$ – технологический параметр оборудования; индексы: $n$ – номер параметра; $N$ – общее количество параметров [26].

Применительно к распознаванию технического состояния турбины Т-250/305-23.5-ДБ вектор $X$ можно представить в виде группы следующих параметров, измеряемых штатными контрольно-измерительными приборами:

$$X = \left\{P^{\text{экс}}; D_0^{\text{экс}}; p_{\text{ТО}}^{\text{экс}}; p_{\text{К-р}}^{\text{экс}}; D_{\text{ПСГ}}^{\text{экс}}\right\}, \quad (2)$$

где $P^{\text{экс}} = \left\{p_1^{\text{экс}}, p_2^{\text{экс}}, ..., p_j^{\text{экс}}, ..., p_J^{\text{экс}}\right\}$ – распределение давления по проточной части паровой турбины, кгс/см$^2$; $p_j^{\text{экс}}$ – экспериментальное абсолютное значение давления пара на входе в $j$-й отсек, кгс/см$^2$; $D_0^{\text{экс}}$ – экспериментальное значение расхода свежего пара на турбину, кг/с; $p_{\text{ТО}}^{\text{экс}}$ – экспериментальное абсолютное значение давления пара в камере теплофикационного отбора турбины, кгс/см$^2$; $p_{\text{К-р}}^{\text{экс}}$ – экспериментальное абсолютное значение вакуума в конденсаторе, кгс/см$^2$; $D_{\text{ПСГ}}^{\text{экс}}$ – экспериментальное значение расхода конденсата греющего пара, сливаемого из сетевых подогревателей, кг/с; индексы: $j$ – номер отсека; $J$ – общее количество отсеков.

**Система непрерывного мониторинга технического состояния и оперативной диагностики паровой турбины.** В основу данной системы положен метод определения эффективной площади проходных сечений отсеков паровой турбины по заданному распределению давления по проточной части, который реализуется в соответствии со следующим алгоритмом.

1. На основании группы технологических параметров оборудования, содержащихся в архиве АСУ ТП и представляющих собой временные ряды, осуществляется выделение данных по установившимся режимам работы паровой турбины за конкретный диапазон времени [7].

2. На основании полученной совокупности данных осуществляется параметрическая идентификация и верификация математической модели турбины. В результате параметрической идентификации происходит определение параметров опорного режима [24].

3. Выполняется решение оптимизационной задачи, целевая функция которой представлена в следующем виде:

$$F(\Phi) = \sum_{j=1}^{J}\left[p_j^{\text{рас}}(D_0^{\text{экс}}; p_{\text{ТО}}^{\text{экс}}; p_{\text{К-р}}^{\text{экс}}; D_{\text{ПСГ}}^{\text{экс}}, \Phi) - p_j^{\text{экс}}\right]^2 \Rightarrow \min_{\Phi} \quad (3)$$

при ограничениях:

$$D_0^{min} \le D_0^{\text{экс}} \le D_0^{max};$$
$$p_{\text{ТО}}^{min} \le p_{\text{ТО}}^{\text{экс}} \le p_{\text{ТО}}^{max};$$
$$p_{\text{К-р}}^{min} \le p_{\text{К-р}}^{\text{экс}} \le p_{\text{К-р}}^{max}; \quad (4)$$
$$D_{\text{ПСГ}}^{min} \le D_{\text{ПСГ}}^{\text{экс}} \le D_{\text{ПСГ}}^{max},$$

где $\Phi = \{\varphi_j\}$ – вектор значений эффективной площади проходных сечений отсеков паровой турбины, б/р; $p_j^{\text{рас}}$ – расчетное значение давления пара на входе в $j$-й отсек, кгс/см²; $D_0^{\min}$ и $D_0^{\max}$ – минимальное и максимальное значения расхода свежего пара на турбину, кг/с; $p_{\text{ТО}}^{\min}$ и $p_{\text{ТО}}^{\max}$ – минимальное и максимальное абсолютное значения давления пара в камере теплофикационного отбора, кгс/см²; $p_{\text{К-р}}^{\min}$ и $p_{\text{К-р}}^{\max}$ – минимальное и максимальное абсолютное значения вакуума в конденсаторе, кгс/см²; $D_{\text{ПСГ}}^{\min}$ и $D_{\text{ПСГ}}^{\max}$ – минимальное и максимальное значения расхода конденсата греющего пара, сливаемого из сетевых подогревателей, кг/с; индексы: $j$ – номер отсека; $J$ – общее количество отсеков.

Основным критерием окончания процесса нахождения минимума целевой функции (3) методом покоординатного спуска [27] является условие

$$\left|\Phi^k - \Phi^{k+1}\right| \le \varepsilon, \quad (5)$$

где $k$ – номер итерации, б/р; $\varepsilon$ – заданная точность расчета, б/р.

4. После определения эффективной площади проходных сечений отсеков паровой турбины для каждого отсека осуществляется диагностика состояния ее проточной части:

- увеличение площади проходного сечения отсека и/или увеличение зазора в диафрагменных и надбандажных уплотнениях, что является следствием абразивного износа и/или износа уплотнений соответственно ($\varphi_j > 1$);
- нормальное состояние, что свидетельствует о неизменности проходных сечений отсеков паровой турбины ($\varphi_j = 1$);
- уменьшение площади проходного сечения отсека, что является следствием заноса солями и окислами ($\varphi_j < 1$).

**Результаты.** Результаты расчетного анализа, выполненного для проверки предложенного метода непрерывного мониторинга технического состояния и оперативной диагностики паровой турбины, на примере теплофикационной турбины Т-250/305-23.5-ДБ представлены на рис. 2, 3. В качестве экспериментальных данных использованы данные из архива АСУ ТП вышеуказанной турбины за период с 20.10. по 1.11.2007 г.

Для параметрической идентификации математической модели турбины Т-250/305-23.5-ДБ использованы данные по установившимся режимам ее работы за период с 20.10. по 29.10.2007 г., за который было найдено 304 режима. При этом диапазон изменения активной мощности составил от 197,59 до 253,36 МВт, диапазон изменения расхода свежего пара – от 734,0 до 933,7 т/ч, диапазон изменения давления пара в камере верхнего теплофикационного отбора – от 0,660 до 1,223 кгс/см²; диапазон изменения вакуума в конденсаторе – от 0,056 до 0,078 кгс/см²; диапазон изменения расхода конденсата греющего пара, сливаемого из сетевых подогревателей, – от 234,6 до 333,6 т/ч.

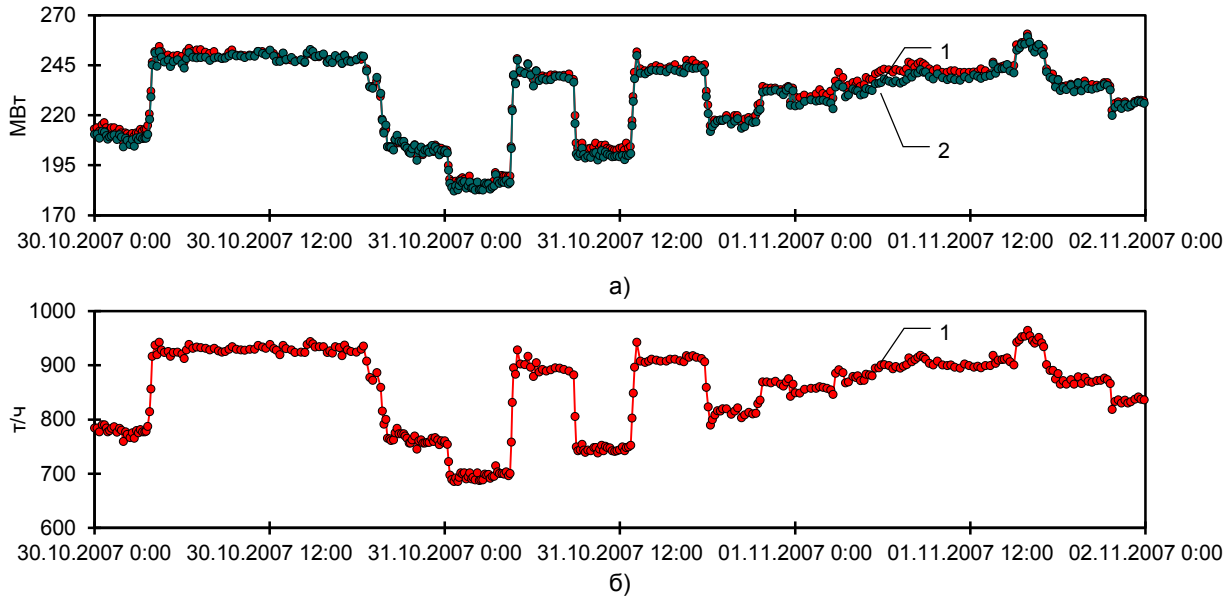
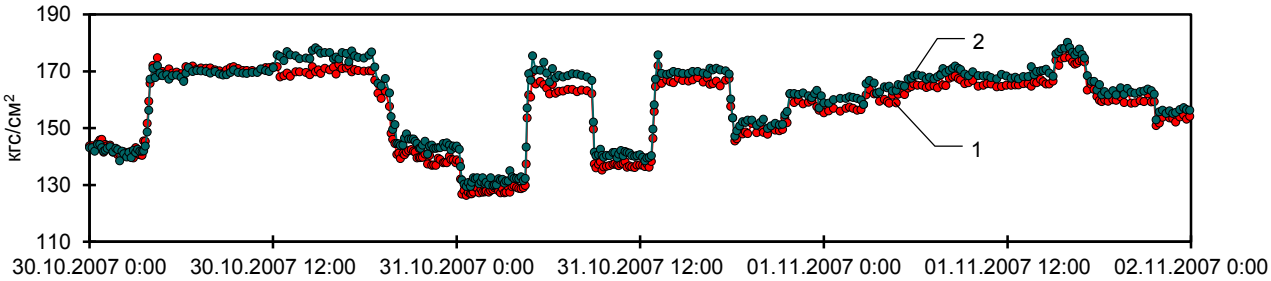
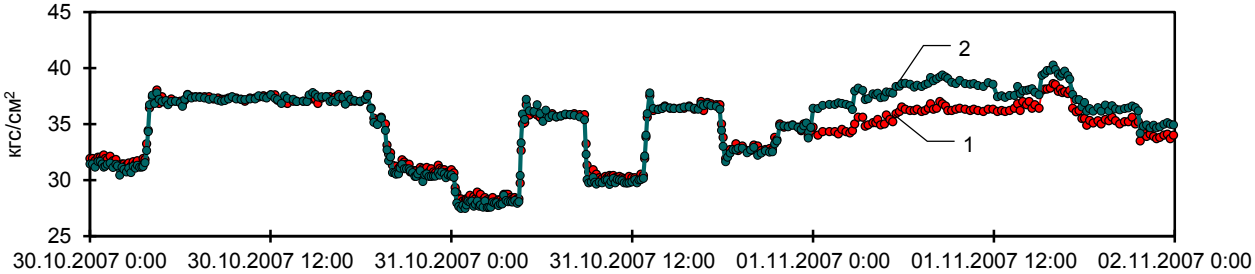


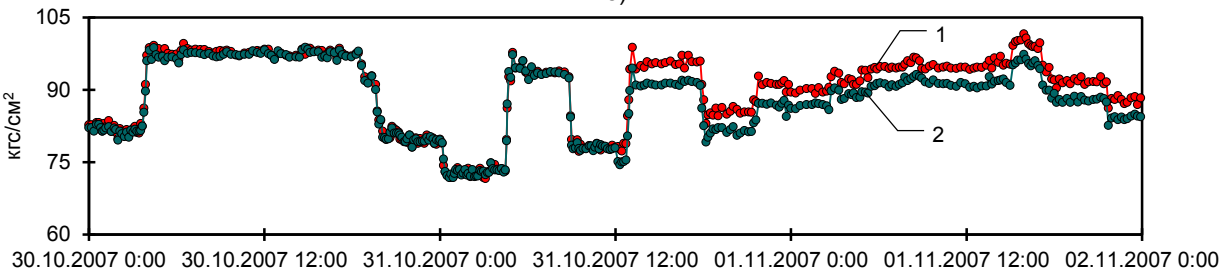

Рис. 2. Графики изменения: а – активной мощности; б – расхода свежего пара; 1 – реальный тренд из архива АСУ ТП; 2 – математическая модель



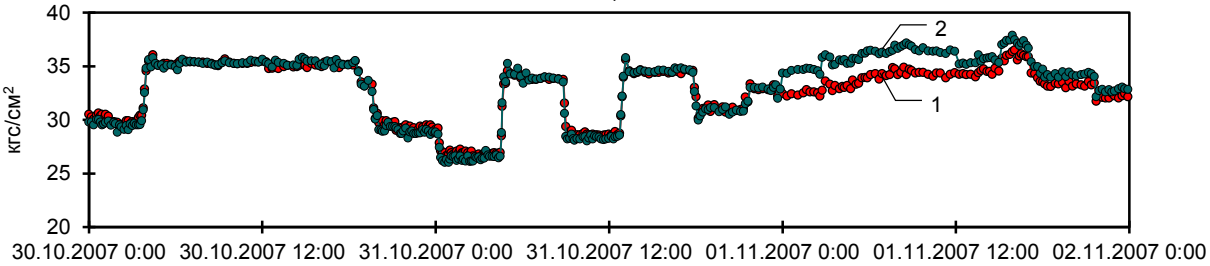

а)



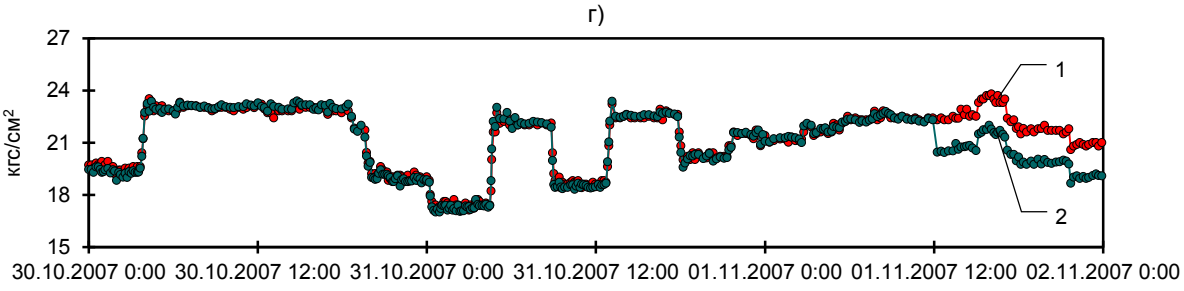

б)



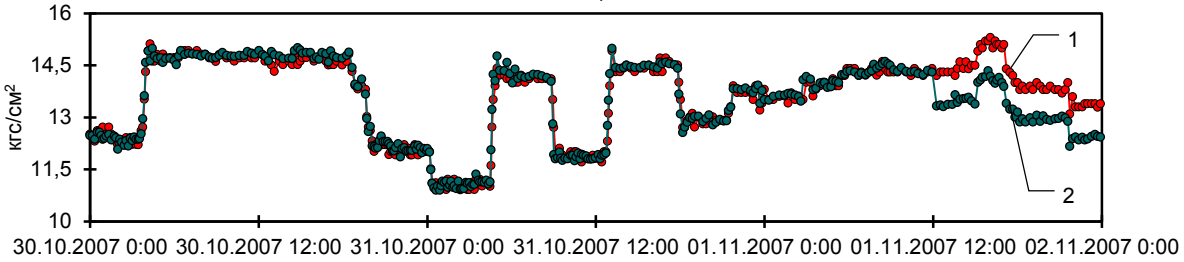

в)




г)




д)




е)

Рис. 3. Графики изменения давления пара: а – в камере регулирующей ступени; б – после 6-й ступени; в – в камере II-го отбора; г – на входе в ЦСД-I; д – в камере III-го отбора; е – в камере IV-го отбора; 1 – реальный тренд из архива АСУ ТП; 2 – математическая модель

В свою очередь, данные за 27.10 и 29.10.2007 г. (68 установившихся режимов работы) использованы для верификации математической модели. В данном случае диапазон изменения активной мощности составил от 198,98 до 249,76 МВт, диапазон изменения расхода свежего пара – от 741,8 до 926,5 т/ч, диапазон изменения давления пара в камере верхнего теплофикационного отбора – от 0,686 до 1,020 кгс/см$^2$; диапазон изменения вакуума в конденсаторе – от 0,071 до 0,077 кгс/см$^2$; диапазон изменения расхода конденсата греющего пара, сливаемого из сетевых подогревателей, – от 271,8 до 321,9 т/ч.

В качестве критериев выбора установившегося режима работы выбраны следующие пределы [7]:

- максимально допустимое отклонение от среднего значения активной мощности ±1 %;
- максимально допустимое отклонение от среднего значения расхода свежего пара ±1 %;
- максимально допустимая разница расходов питательной воды и свежего пара ±5 %;
- максимально допустимое отклонение от среднего значения начального давления пара ±2 %;
- максимально допустимое отклонение от среднего значения начальной температуры пара ±6 $^{o}$C;
- максимально допустимое отклонение от среднего значения температуры пара после промежуточного перегрева ±6 $^{o}$C;
- максимально допустимое отклонение от среднего значения давления пара в камере регулируемого отбора ±2 %;
- максимально допустимое отклонение от среднего значения давления отработавшего пара ±5 %;
- максимально допустимое отклонение от среднего значения коэффициента мощности ±0,05.

Количественной оценкой адекватности математической модели служат величины относительной ошибки прогноза и среднеквадратичного отклонения результатов расчета, выполненного по модели паровой турбины, от экспериментальных данных. В свою очередь, проведенный статистический анализ [28] полученных данных показал, что математическая модель ПТУ Т-250/305-23.5-ДБ во всем рассматриваемом диапазоне изменения расхода свежего пара позволяет определить активную мощность, давление пара в камере регулирующей ступени, после 6-й ступени, в камерах II, III и IV отборов и на входе в ЦСД-I с относительной ошибкой 0,83; 0,51; 0,66; 0,77; 0,64; 0,42 и 0,75 % соответственно, а также со среднеквадратичным отклонением 2,19 МВт; 0,82; 0,60; 0,32; 0,17; 0,07 и 0,31 кгс/см$^2$ соответственно. Таким образом, математическая модель паровой турбины признана адекватной, так как она позволяет определить активную мощность, давление пара в камере регулирующей ступени, после 6-й ступени, в камерах II, III и IV отборов турбины и на входе в ЦСД-I с приемлемой для инженерных расчетов точностью.

Для проверки работоспособности метода диагностики технического состояния проточной части паровой турбины проведен численный эксперимент. В различные моменты времени с интервалом в 12 часов в период с 30.10 по 1.11.2007 г. вносятся следующие тестовые модельные возмущения (рис. 2, 3):

- занос солями и окислами отсека между камерой регулирующей ступени и после 6-й ступени ЦВД ($\varphi_1$ = 0,95);
- абразивный износ и/или увеличение зазора в диафрагменных и надбандажных уплотнениях отсека между 7-й ступенью ЦВД и камерой I-го отбора ($\varphi_2$ = 1,06);
- нормальное состояние отсека между камерами I-го и II-го отборов ($\varphi_3$ = 1,00);
- занос солями и окислами отсека между входом в ЦСД-I и камерой III -го отбора ($\varphi_4$ = 0,90);
- абразивный износ и/или увеличение зазора в диафрагменных и надбандажных уплотнениях отсеков между камерами III-го и IV-го отборов ($\varphi_5$ = 1,10) и между камерами IV-го и V-го отборов ($\varphi_6$ = 1,07).

Анализ результатов показал, что предложенный метод диагностики технического состояния проточной части позволяет на всем рассматриваемом промежутке времени определить эффективную площадь проходных сечений отсеков паровой турбины с относительной погрешностью 3,1 %. После внесения всех вышеуказанных тестовых возмущений в ходе решения оптимизационной задачи (3) в момент времени 20:00 за 1.11.2007 г. были определены следующие значения компонентов вектора $\Phi$: $\varphi_1$ = 0,9489; $\varphi_2$ = 1,0614; $\varphi_3$ = 1,0017; $\varphi_4$ = 0,9059; $\varphi_5$ = 1,1044; $\varphi_6$ = 1,0689.

**Выводы.** Разработанные математическая модель теплофикационной паровой турбины Т-250/305-23.5-ДБ и метод непрерывного мониторинга технического состояния и оперативной диагностики паровой турбины позволяют локализовать отклонения и идентифицировать аномалии путем восстановления по заданному распределению давления по проточной части проходных сечений отсеков парой турбины. Кроме того, приведенные результаты статистического анализа моделирования продемонстрировали адекватность разработанной модели турбины и перспективность ее использования. Метод оперативной диагностики проточной части паровой турбины продемонстрировал непротиворечивость получаемых результатов и пригодность для решения задач диагностики на практике.

Таким образом, разработанный метод непрерывного мониторинга технического состояния и оперативной диагностики паровой турбины по изменению распределения давления по ее проточной части может быть использован для анализа технического состояния действующего энергетического оборудования в условиях его промышленной эксплуатации. Кроме того, модель и метод могут быть использованы в качестве модуля при создании программного комплекса предиктивной аналитики энергетического оборудования.

### Список литературы


1. **Стратегия** ремонтов паровых турбин на основе анализа надежности их узлов / Б.Е. Мурманский, Ю.М. Бродов, В.В. Лебедев, С.В. Васенин // Надежность и безопасность энергетики. – 2014. – № 4(27). – С. 58–63.
2. **Снижение** абразивной эрозии турбинных ступеней перегретого пара / В.Г. Орлик, Н.В. Аверкина, А.А. Азнабаев и др. // Электрические станции. – 2008. – № 12. – С. 33–41.
3. **Модернизация** первой ступени ЦСД турбины К-300-240 ЛМЗ с целью уменьшения эрозионно-абразивного износа проточной части / В.А. Хаимов, Ю.А. Воропаев, А.И. Левченко, Л.В. Федорова // Электрические станции. – 2011. – № 9. – С. 8–16.
4. **Хаимов В.А., Качуринер Ю.Я., Воропаев Ю.А.** Эрозионный износ твердыми частицами проточной части ЦСД-1 Т-250/300-240 // Электрические станции. – 2004. – № 4. – С. 14–20.
5. **Отработка** режима химической промывки турбин К-300-240 ХТГЗ под нагрузкой / Н.Г. Клейменов, В.М. Андрюшин, Е.Н. Коржов, А.В. Агапова // Теплоэнергетика. – 1977. – № 1. – С. 52–55.
6. **Влияние** водного режима работы паровых турбин сверхкритических параметров / Т.Х. Маргулова, Б.М. Трояновский, Г.С. Самойлович и др. // Теплоэнергетика. – 1977. – № 2. – С. 40–43.
7. **Сахаров А.М.** Тепловые испытания паровых турбин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 238 с.
8. **Технические** средства диагностирования: Справочник / В.В. Клюев, П.П. Пархоменко, В.Е. Абрамчук и др.; под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
9. **Перминов И.А., Орлик В.Г.** Диагностика технического состояния проточной части ЦВД и ЦСД по эксплуатационным измерениям давлений и температур пара в турбине // Электрические станции. – 2003. – № 6. – С. 38–41.
10. **Эксплуатационная** диагностика теплового состояния и экономичности паровых турбин ТЭС и АЭС / В.В. Божко, А.Н. Коваленко, В.М. Ляпунов, Л.А. Хоменко // Теплоэнергетика. – 2016. – № 5. – С. 45–50.
11. **Развитие** и совершенствование систем эксплуатационной диагностики производства ОАО НПО ЦКТИ турбоагрегатов ТЭС и АЭС / И.А. Ковалев, В.Г. Раковский, Н.Ю. Исаков, А.В. Сандовский // Теплоэнергетика. – 2016. – № 3. – С. 15–20.
12. **Опыт** эксплуатации системы диагностики рабочих лопаток ЦНД турбины К-210 ст. №2 Шатурской ГРЭС-5 / В.М. Гвоздев, А.И. Поляков, Н.Ю. Исаков, Э.С. Мандрыка // Электрические станции. – 2001. – № 8. – С. 16–18.
13. **Хаимов В.А.** Оптическая диагностика проточной части паровых турбин // Электрические станции. – 2014. – № 2. – С. 7–15.
14. **Дон Э.А., Тарадай Д.В., Буглаев К.Е.** Система диагностики температурных расширений турбоагрегатов // Электрические станции. – 2012. – № 9. – С. 42–47.
15. **Буглаев К.Е., Дон Э.А., Тарадай Д.В.** Применение системы СДАРТ для диагностики температурных расширений турбоагрегата // Теплоэнергетика. – 2005. – № 6. – С. 23–28.
16. **Актуальность** и проблема реализации мониторинга крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов на электростанциях / М.А. Биялт, П.Е. Черненок, Е.В. Бочкарев и др. // Электрические станции. – 2013. – № 8. – С. 50–57.
17. **Калашников А.А.** Некоторые вопросы развития автоматической диагностики систем регулирования турбоагрегатов // Теплоэнергетика. – 1988. – № 10. – С. 25–28.
18. **Беликов Н.В., Занимонец Ю.М., Козлов Е.Г.** Автоматизированная система для испытаний, контроля и диагностики паровых турбин всех типов // Теплоэнергетика. – 2000. – № 11. – С. 39–41.
19. **Ковалев И.А., Исаков Н.Ю., Божков В.В.** Комплексная диагностика как необходимое средство обеспечения эксплуатационной надежности турбоагрегата // Теплоэнергетика. – 2012. – № 3. – С. 12–17.
20. **Разработка** элементов системы мониторинга технического состояния турбоагрегатов ТЭС и АЭС / С.Н. Бойченко, В.Н. Костюков, Н.Ю. Кузьминых и др. // Теплоэнергетика. – 2017. – № 8. – С. 14–23.
21. **Коршикова А.А., Идзон О.М.** Модель раннего обнаружения аварийных ситуаций на оборудовании электростанций на основе метода наименьших потенциалов // Теплоэнергетика. – 2021. – № 10. – С. 37–44.
22. **Опыт** использования удаленного доступа и предсказательной аналитики состояния энергетического оборудования / С.А. Наумов, А.В. Крымский, М.А. Липатов, Д.Н. Скрабатун // Теплоэнергетика. – 2018. – № 4. – С. 21–33.
23. **Опыт** создания системы автоматического распознавания аномалий в работе энергетического оборудования / Д.Н. Немирович-Скрабатун, А.А. Персяев // Электрические станции. – 2022. – № 1. – С. 49–56.
24. **Математическая** модель расходных характеристик паротурбинных установок / К.Н. Бубнов, В.П. Жуков, С.Д. Горшенин, Е.В. Барочкин // Вестник ИГЭУ. – 2022. – Вып. 5. – С. 72–79.
25. **Жуков В.П., Барочкин Е.В.** Системный анализ энергетических тепломассообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
26. **Биргер И.А.** Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
27. **Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В.** Вычислительные методы для инженеров. – М.: Высш. шк., 1994. – 544 с.
28. **Гмурман В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.


### References


1. Murmanskiy, B.E., Brodov, Yu.M., Lebedev, V.V., Vasenin, S.L. Strategiya remontov parovykh turbin na osnove analiza nadezhnosti ikh uzlov [Steam turbine repair strategy based on reliability analysis of their components]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*, 2014, no. 4(27), pp. 58–63.
2. Orlik, V.G., Averkina, N.V., Aznabaev, A.A., Kachuriner, Yu.Ya., Nosovitskiy, I.A., Filaretov, M.A., Chervonnyy, V.F. Snizhenie abrazivnoy erozii turbinnykh

stupeney peregretogo para [Reduction of abrasive erosion of superheated steam turbine stages]. *Elektricheskie stantsii*, 2008, no. 12, pp. 33–41.

3. Khaimov, V.A., Voropaev, Yu.A., Levchenko, A.I., Fedorova, L.V. Modernizatsiya pervoy stupeni TsSD turbiny K-300-240 LMZ s tsel'yu umen'sheniya erozionno-abrazivnogo iznosa protochnoy chasti [Modernization of the first stage of the IPC of the K-300-240 LMZ turbine in order to reduce the erosion-abrasive wear of the flow path]. *Elektricheskie stantsii*, 2011, no. 9, pp. 8–16.

4. Khaimov, V.A., Kachuriner, Yu.Ya., Voropaev, Yu.A. Erozionnyy iznos tverdymi chastitsami protochnoy chasti TsSD-1 T-250/300-240 [Erosion wear by solid particles of the flow part of the IPC-1 T-250/300-240]. *Elektricheskie stantsii*, 2004, no. 4, pp. 14–20.

5. Kleymenov, N.G., Andryushin, V.M., Korzhov, E.N., Agapova, A.V. Otrabotka rezhima khimicheskoy promyvki turbin K-300-240 KhTGZ pod nagruzkoy [Development of chemical washing of turbines K-300-240 KhTGZ under load]. *Teploenergetika*, 1977, no. 1, pp. 52–55.

6. Margulova, T.Kh., Troyanovskiy, B.M., Samoylovich, G.S., Razumovskaya, E.D., Kuz'micheva, L.V. Vliyanie vodnogo rezhima raboty parovykh turbin sverkhkriticheskikh parametrov [Influence of water mode of operation of supercritical steam turbines]. *Teploenergetika*, 1977, no. 2, pp. 40–43.

7. Sakharov, A.M. *Teplovye ispytaniya parovykh turbin* [Thermal tests of steam turbines]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 238 p.

8. Klyuev, V.V., Parkhomenko, P.P., Abramchuk, V.E. *Tekhnicheskie sredstva diagnostirovaniya* [Diagnostic hardware]. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 672 p.

9. Perminov, I.A., Orlik, V.G. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya protochnoy chasti TsVD i TsSD po ekspluatatsionnym izmereniyam davleniy i temperatur para v turbine [Diagnostics of the technical condition of the HPC and IPC flow part by operational measurements of pressure and temperature of steam in the turbine]. *Elektricheskie stantsii*, 2003, no. 6, pp. 38–41.

10. Bozhko, V.V., Kovalenko, A.N., Lyapunov, V.M., Khomenko, L.A. Ekspluatatsionnaya diagnostika teplovogo sostoyaniya i ekonomichnosti parovykh turbin TES i AES [Operational diagnostics of thermal state and efficiency of steam turbines of TPP and NPP]. *Teploenergetika*, 2016, no. 5, pp. 45–50.

11. Kovalev, I.A., Rakovskiy, V.G., Isakov, N.Yu., Sandovskiy, A.V. Razvitie i sovershenstvovanie sistem ekspluatatsionnoy diagnostiki proizvodstva OAO NPO TsKTI turboagregatov TES i AES [Development and improvement of the operating diagnostics systems of NPO CKTI works for turbine units of TPP and NPP]. *Teploenergetika*, 2016, no. 3, pp. 15–20.

12. Gvozdev, V.M., Polyakov, A.I., Isakov, N.Yu., Mandryka, E.S. Opyt ekspluatatsii sistemy diagnostiki rabochikh lopatok TsND turbiny K-210 st. №2 Shaturskoy GRES-5 [Experience in operation of the diagnostics system for LPC turbine rotor blades K-210 st. No. 2 of Shaturskaya GRES-5]. *Elektricheskie stantsii*, 2001, no. 8, pp. 16–18.

13. Khaimov, V.A. Opticheskaya diagnostika protochnoy chasti parovykh turbin [Optical diagnostics of the steam turbine flow path]. *Elektricheskie stantsii*, 2014, no. 2, pp. 7–15.

14. Don, E.A., Taraday, D.V., Buglaev, K.E. Sistema diagnostiki temperaturnykh rasshireniy turboagregatov [Turbine unit temperature expansion diagnostics system]. *Elektricheskie stantsii*, 2012, no. 9, pp. 42–47.

15. Buglaev, K.E., Don, E.A., Taraday, D.V. Primenenie sistemy SDART dlya diagnostiki temperaturnykh rasshireniy turboagregata [Application of SDART system for diagnostics of turbine unit temperature expansions]. *Teploenergetika*, 2005, no. 6, pp. 23–28.

16. Biyalt, M.A., Chernenok, P.E., Bochkarev, E.V., Ur'ev, E.V. Aktual'nost' i problema realizatsii monitoringa krutil'nykh kolebaniy valoprovodov turboagregatov na elektrostantsiyakh [Relevance and problem of implementation of torsional oscillations monitoring of turbine unit shaft lines at power plants]. *Elektricheskie stantsii*, 2013, no. 8, pp. 50–57.

17. Kalashnikov, A.A. Nekotorye voprosy razvitiya avtomaticheskoy diagnostiki sistem regulirovaniya turboagregatov [Some issues of development of automatic diagnostics of turbine control systems]. *Teploenergetika*, 1988, no. 10, pp. 25–28.

18. Belikov, N.V., Zanimonets, Yu.M., Kozlov, E.G. Avtomatizirovannaya sistema dlya ispytaniy, kontrolya i diagnostiki parovykh turbin vsekh tipov [Automated system for testing, monitoring and diagnostics of steam turbines of all types]. *Teploenergetika*, 2000, no. 11, pp. 39–41.

19. Kovalev, I.A., Isakov, N.Yu., Bozhkov, V.V. Kompleksnaya diagnostika kak neobkhodimoe sredstvo obespecheniya ekspluatatsionnoy nadezhnosti turboagregata [Comprehensive diagnostics as a necessary tool for ensuring operational reliability of turbine units]. *Teploenergetika*, 2012, no. 3, pp. 12–17.

20. Boychenko, S.N., Kostyukov, V.N., Kuz'minykh, N.Yu., Kumenko, A.I., Timin, A.V. Razrabotka elementov sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya turboagregatov TES i AES [Development of elements of the condition monitoring system of turbine units of TPP and NPP]. *Teploenergetika*, 2017, no. 8, pp. 14–23.

21. Korshikova, A.A., Idzon, O.M. Model' rannego obnaruzheniya avariynykh situatsiy na oborudovanii elektrostantsiy na osnove metoda naimen'shikh potentsialov [Model of early detection of emergencies on power plant equipment based on the least potential method]. *Teploenergetika*, 2021, no. 10, pp. 37–44.

22. Naumov, S.A., Krymskiy, A.V., Lipatov, M.A., Skrabatun, D.N. Opyt ispol'zovaniya udalennogo dostupa i predskazatel'noy analitiki sostoyaniya energeticheskogo oborudovaniya [Experience in use of remote access and predictive analytics of the state of power equipment]. *Teploenergetika*, 2018, no. 4, pp. 21–33.

23. Nemirovich-Skrabatun, D.N., Persyaev, A.A. Opyt sozdaniya sistemy avtomaticheskogo raspoznavaniya anomaliy v rabote energeticheskogo oborudovaniya [Experience in creating an automatic anomaly recognition system in the operation of power equipment]. *Elektricheskie stantsii*, 2022, no. 1, pp. 49–56.

24. Bubnov, K.N., Zhukov, V.P., Gorshenin, S.D., Barochkin, E.V. Matematicheskaya model' raskhodnykh kharakteristik paroturbinnykh ustanovok [Mathematical model of flow characteristics of steam turbine plant]. *Vestnik IGEU*, 2022, issue 5, pp. 72–79.

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

26. Birger, I.A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 239 p.

27. Amosov, A.A., Dubinskiy, Yu.A., Kopchenova, N.V. *Vychislitel'nye metody dlya inzhenerov* [Computational methods for engineers]. Moscow: Vysshaya shkola, 1994. 544 p.

28. Gmurman, V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola, 2003. 479 p.

# ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.522

**Владимир Алексеевич Нечаев**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, e-mail: nechaev@gapps.ispu.ru

**Сергей Витальевич Косяков**
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой программного обеспечения компьютерных систем, Россия, Иваново, e-mail: ksv@ispu.ru

## Метод разработки моделей распознавания речи для использования в информационных системах энергетики

**Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** В настоящее время при разработке моделей автоматического распознавания речи для специализированных предметных областей, в частности для объектов энергетики, используются архитектуры глубоких нейронных сетей, которые требуют большого объема обучающих данных. При этом модели часто оказываются слабо пригодными для эксплуатации в конкретных информационных системах из-за некачественного распознавания специализированной предметной лексики. Дополнительное обучение моделей в части улучшения их качества в конкретном контексте распознавания наталкивается на сложности получения достаточного объема данных и трудоемкость их разметки. В связи с этим актуальной задачей является создание методов, позволяющих снизить трудоемкость построения прикладных моделей распознавания речи и улучшить их качество при использовании в предметных областях, в частности в области энергетики.
**Материалы и методы.** Применены методы тематического моделирования текста на основе языковых моделей для адаптации открытых данных. В качестве предобученной модели распознавания речи использована глубокая нейронная сеть. Для обучения использованы наборы данных из открытых источников.
**Результаты.** Разработан метод создания моделей автоматического распознавания речи для специализированных предметных областей, который включает этап промежуточного обучения лексике предметной области на данных из открытых источников, отобранных с использованием тематического семплирования. На основе метода создана и исследована модель автоматического распознавания речи для объектов энергетики, которая показала более высокие результаты распознавания, чем модели, полученные традиционными способами.
**Выводы.** Апробация предложенного метода подтвердила его эффективность. Разработанная на основе метода прикладная нейросетевая модель продемонстрировала возможность работы в информационных системах объектов энергетики на русском и английском языках без дополнительного обучения на закрытых данных.

**Ключевые слова:** модели распознавания речи, машинное обучение, методы тематического моделирования текста, нейронная сеть, языковая модель

© Нечаев В.А., Косяков С.В., 2023
Вестник ИГЭУ, 2023, вып. 4, с. 94–100.

**Vladimir Alekseevich Nechaev**
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, e-mail: nechaev@gapps.ispu.ru

**Sergey Vitalyevich Kosyakov**
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Computer Systems Software Department, Russia, Ivanovo, e-mail: ksv@ispu.ru

# Development of automatic speech recognition model for energy facilities

**Abstract**

**Background.** Currently, when developing automatic speech recognition models for specialized subject areas, in particular for energy facilities, deep neural network architectures are used, which require a large amount of training data. At the same time, models often turn out to be poorly suitable for use in specific information systems due to poor-quality recognition of highly specialized subject vocabulary. Additional training of models to improve their quality in a specific context of recognition encounters the difficulty to obtain a sufficient amount of data and the laboriousness of their markup. Thus, an urgent task is to create methods that allow reducing the complexity of developing applied speech recognition models and improving their quality when used in subject areas, in particular, in the field of energy.
**Materials and methods.** Methods of thematic text modeling based on language models for adapting open data are applied. A deep neural network is used as a pretrained speech recognition model. For training, open-source datasets are used.
**Results.** A method to develop automatic speech recognition models for specialized subject areas has been developed. It includes the stage of intermediate learning of subject area vocabulary based on open-source data selected using thematic sampling. Based on the method, the authors have developed and studied a model of automatic speech recognition for energy facilities. It has showed higher recognition results than models obtained by traditional methods.
**Conclusions.** Approbation of the proposed method has confirmed its effectiveness. The applied neural network model developed on the method has demonstrated the possibility to work in the information systems of energy facilities in Russian and English without additional training on proprietary data.

**Key words:** automatic speech recognition models, machine learning, thematic modelling methods, neural network, language model

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.4.094-100

**Введение.** Автоматическое распознавание речи (англ. *Automatic Speech Recognition* – ASR) является одной из ключевых технологий человеко-машинного взаимодействия, позволяющей сократить время от команды, данной человеком, до выполнения ее машиной. Задача таких систем состоит в преобразовании речи в текст, который далее обрабатывается с помощью моделей для естественного языка (англ. *Natural Language Processing*). В настоящее время наилучшее качество распознавания показывают глубокие нейросетевые модели машинного обучения (англ. *Deep Neural Networks*) на основе архитектуры Transformer и механизма внимания [1, 2], которые напрямую переводят речь в последовательность токенов («сквозные» End-to-End модели) [3].

Технология распознавания речи может применяться на объектах энергетического сектора в САПР и на производстве [4], при распознавании телефонных разговоров в ситуационных центрах и службах поддержки пользователей [5]. Применение автоматического распознавания речи в энергетическом секторе позволяет оптимизировать множество процессов, улучшить обслуживание клиентов и ускорить реакцию на происшествия. С помощью технологии распознавания речи можно вводить данные голосом для выполнения команд, что упрощает работу операторов и позволяет ускорить поиск необходимой справочной информации в базах данных. В службах поддержки пользователей и ситуационных центрах распознавание речи может использоваться для автоматизации и оптимизации процессов обработки запросов, что позволяет повысить эффективность работы человека-оператора.

Особенность современных архитектур распознавания речи заключается в том, что для тренировки и тестирования требуется большой объем качественных данных, размеченных человеком вручную [6]. Сбор данных представляет собой запись речи и ее транскрипцию. При этом данные для тренировки должны быть диверсифицированными. Они должны содержать специфичную для данной предметной области лексику. Это условие составляет существенную проблему: на практике, например на объектах энергетического сектора, таких данных обычно недостаточно либо доступ к ним ограничен на основании политик информационной безопасности и конфиденциальности. Часто размеченная речь отсутствует вовсе. Как следствие, при использовании систем распознавания речи страдает качество распознавания узкоспециализированной лексики и терминов предметной области, что часто делает модель практически непригодной для использования.

В настоящее время для решения этой проблемы применяются различные комбинации

методов, расширяющих возможности использования общеязыковых (не ориентированных на конкретную предметную область) моделей распознавания речи. Примерами таких подходов являются постобработка распознанного текста и генерация данных для дополнительного обучения с использованием синтезаторов речи [7].

Применение методов постобработки распознанного текста ограничивает возможность использования моделей в реальном времени, так как снижается общая производительность системы и увеличиваются накладные расходы на вычисления. Также зачастую постобработка не может быть применена из-за большой фонетической вариативности при распознавании лексики предметной области.

Использование методов генерации данных путем синтеза речи для увеличения объема тренировочных данных пока не позволяет получать устойчивые модели, а стоимость доступа к более продвинутым технологиям генерации речи превышает стоимость сбора и разметки данных классическим способом, т. е. с помощью человека.

Целью настоящего исследования является разработка метода, позволяющего снизить затраты на получение размеченных тематических данных для обучения узкоспециализированной лексике, и изучение возможности применения этого метода при создании модели распознавания речи в предметных областях, связанных с энергетикой.

**Методы исследования.** Традиционный подход к созданию тематических моделей распознавания речи предполагает адаптацию общеязыковой модели к особенностям лексики предметной области путем ее дополнительного обучения на данных предметной области. В открытом доступе находится большое количество общих языковых данных для распознавания речи общей продолжительностью более тридцати тысяч часов. Если применять эти наборы для обучения моделей распознавания напрямую без адаптации, то возможно получить только общую модель, не адаптированную к предметной области.

Как уже отмечалось, именно получение достаточного объема качественных размеченных данных для обучения узкоспециализированной лексике составляет существенную трудность и требует высоких затрат. Для решения проблемы сложности этапа обучения модели на тематических данных при создании прикладной информационной системы предложено разделить процесс дополнительного обучения языковой модели на два этапа.

1. На первом этапе необходимо провести анализ и обработку доступных открытых данных, размеченных для обучения. Выбрать из них данные, содержащие лексику предметной области, и провести обучение общеязыковой модели на этих данных.

2. На втором этапе оценивается качество полученной модели. В случае необходимости создается ограниченный набор дополнительных данных вручную и проводится дообучение модели на этих данных.

При таком подходе первый этап может быть автоматизирован и не требует больших затрат на реализацию. При этом он обеспечивает возможность распознавания основной части тематической лексики и позволяет повысить качество распознавания за счет возможности получения достаточного объема и качества обучающих выборок. Реализация второго этапа в этом случае требует значительно меньших затрат данных. В итоге общая продолжительность и сложность процесса получения специализированной модели снижается, а ее качество увеличивается.

Для реализации предложенного метода необходимо разработать средства обработки открытых наборов данных и извлечения из них тематических данных. Открытые наборы данных представляют собой коллекции одноканальных аудиофайлов длительностью до 30 секунд, каждому из которых соответствует транскрипция – текстовый файл, написанный человеком вручную. Каждый аудио и текстовый файл из открытых наборов данных – это одно или несколько коротких предложений, являющихся частью диалога, озвученного объявления, аудиокниги, новости, подкаста и т.д. Используемые модели распознавания речи учитывают контекст и корректируют вывод только на промежутках до 30 секунд, поэтому важно отбирать данные на уровне фрагментов соответствующей продолжительности.

В рамках проведенного исследования для создания модели на русском языке был использован корпус данных Russian Open Speech To Text [8] общей продолжительностью 20000 часов. Для английского языка за основу взяты следующие наборы данных общей продолжительностью 15000 часов: Gigaspeech [9], LibriSpeech [10], Common Voice [11], Multilingual LibriSpeech [12], M-AILABS [13], mTEDx [14], VoxPopuli [15], VoxForge [16].

Процесс построения тематической модели выполнялся на текстовой части всех данных для каждого языка следующим образом:

1. С помощью языковой модели MPNet [17] были получены векторные представления каждого текстового файла в многомерном пространстве размерности 768.

2. С помощью метода равномерной аппроксимации многообразия и проекции для уменьшения размерности UMAP [18] векторные представления документов были переведены в пространство пониженной 10-мерной размерности (минимальное количество соседних точек

выборки – 15; в качестве метрики расстояния выбрана косинусная мера).

3. Используя метод кластеризации на основе иерархической плотности HDBSCAN [19], было выполнено преобразование:

$$T = f_T\left(f_r\left(f_v\left(D\right)\right)\right), \quad (1)$$

где $T$ – множество тематических кластеров (категорий) текстовых документов; $f_T$ – функция кластеризации; $f_r$ – функция снижения размерности; $f_v$ – функция извлечения семантического вектора (англ. embedding); $D$ – множество текстовых файлов с ручной разметкой (документов).

В результате было получено 520 тематических кластеров (категорий) для русского языка и 543 аналогичных кластера для английского языка. Каждая категория описывается набором из 10 наиболее характерных слов и словосочетаний (токенов), которые определяются с помощью TF-IDF меры на основе классов [20]. Далее вручную были отобраны категории, которые относятся к энергетике, транспорту и информационным технологиям. Формально это можно описать выражением

$$W_{\text{отб}} \subseteq f_{c-TF-IDF}\left(T, D\right) \Rightarrow D_{\text{отб}} \subseteq D, \quad (2)$$

где $W_{\text{отб}}$ – множество отобранных кластеров; $f_{c-TF-IDF}$ – функция TF-IDF на основе классов от множества тематических кластеров $T$ и текстовых файлов $D$; $D_{\text{отб}}$ – множество отобранных документов.

Примеры описаний отобранных кластеров содержат следующие токены (на английском языке): energy, power, solar, battery, charger, plant, oil, carbon, technology, digital, data, computer и др. Для русского языка отобранные кластеры описываются аналогичными токенами. В результате для английского языка отобрано: 31 кластер, что соответствует 250 тысячам аудиофайлов с транскрипциями из открытых наборов данных общей продолжительностью 320 часов. Для русского языка: 36 кластеров, 280 тысяч аудиофайлов продолжительностью 358 часов. Данные разделены на тренировочную и тестовые подвыборки в соотношении 9 к 1 соответственно.

4. Используя библиотеку с открытым исходным кодом NVIDIA NeMo [21] и данные, полученные с помощью описанного способа тематического семплирования, была произведена тонкая настройка (англ. fine-tuning) моделей распознавания речи. В качестве архитектур выбраны глубокие нейронные сети Citrinet [22] и Conformer-CTC [23]. Инициализация произведена с весов общего назначения указанных архитектур для русского и английского языков. В процессе тонкой настройки применялись разные скорости обучения (англ. learning rate) от 0,01 до 0,1. Обучение производилось на сервере с четырьмя графическими ускорителями (GPU) NVIDIA Tesla V100 в течение 24 часов для архитектуры Citrinet и 48 часов для архитектуры Conformer-CTC для каждого языка.

В итоге были получены модели распознавания речи на английском и русском языках, которые ориентированы на применение в информационных системах энергетики.

**Исследование разработанной модели.** Для оценки качества полученных моделей распознавания речи были подготовлены тестовые наборы данных. Эти данные получены на производственных объектах и представляют собой записи телефонных разговоров сотрудников колл-центра с пользователями, состоят из аудиофайлов с текстовыми транскрипциями, выполненными разметчиками вручную. Тестовые данные использовались исключительно для оценки качества и не участвовали в процессе обучения. Для русского и английского языков подготовлено по 400 семплов длительностью до 20 секунд каждый – в общей сложности по 2 часа размеченных тестовых данных.

Тестовые данные подавались на вход моделей, а полученные (распознанные) в результате строки сравнивались с данными, записанными людьми. Использованы метрики качества: частота ошибок в словах (англ. word error rate, WER); частота ошибок в символах (англ. character error rate, CER). Также, по аналогии с предыдущими метриками, применена метрика частоты ошибок в терминах предметной области (англ. term error rate, TER), которая показывает, как модель справляется с распознаванием специфической лексики предметной области:

$$TER = \frac{S_t + D_t + I_t}{N_t}, \quad (3)$$

где $S_t$, $D_t$, $I_t$ – количество замен, удалений и вставок терминов, которые необходимо выполнить, чтобы получить исходную (тестовую) строку терминов из полученной (предсказанной) в результате работы модели; $N_t$ – общее количество терминов в тестовой строке.

Для расчета метрики TER в тестовой и предсказанной строках остаются только целевые термины, определяемые словарем специфической лексики, который составляется вручную для данной предметной области. Остальные слова удаляются.

В таблице приведены результаты тестирования моделей для русского и английского языков: Cit. и Conf. означают архитектуры Citrinet и Conformer-CTC соответственно, общ. – модель общего назначения, мод. – модель дообученная на тематически семплированных данных (модифицированная для предметной области).

Анализ данных таблицы показывает, что для всех архитектур и языков на тестовой выборке лучше показывают себя модифицированные модели, а архитектура Conformer-CTC превосходит Citrinet. На улучшения указывают сниженные значения всех используемых мет-

рик качества – частоты ошибок в словах, символах и терминах.

**Результаты оценки моделей распознавания речи**

| Модель | WER, % | CER, % | TER, % |
|---|---|---|---|
| Cit., англ., общ. | 17,3 | 12,2 | 21,1 |
| **Cit., англ., мод.** | **15,5** | **10,4** | **19,2** |
| Cit., рус., общ. | 18,8 | 13,4 | 22,6 |
| **Cit., рус., мод.** | **16,3** | **11,5** | **19,7** |
| Conf., англ., общ. | 14,5 | 9,5 | 17,8 |
| **Conf., англ., мод.** | **11,8** | **7,7** | **15,2** |
| Conf., рус., общ. | 15,1 | 9,9 | 18,6 |
| **Conf., рус., мод.** | **12,2** | **8,3** | **16,4** |

Модифицированные модели, дообученные на тематических данных, показывают значения метрик WER, CER и TER лучше, чем исходные модели общего назначения, в среднем на 2–3 %. Для того чтобы проверить, не находятся ли результаты оценок в пределах колебаний средних значений, был использован метод оценки *t*-критерия Стьюдента для двух связанных выборок [24]. В результате проверки для каждой пары моделей до и после модификации для каждой метрики получены значения p-критерия (p-value) ниже 0,04. Это позволяет отвергнуть нулевую гипотезу при достигаемом уровне значимости 5 % о том, что метрики моделей до и после дообучения имеют одинаковые средние значения.

Во всех экспериментах CER показывает значения меньше, чем WER. Это говорит о том, что модели на уровне символов более точны, чем модели на уровне отдельных слов, т. е. модели склонны возвращать слова так, как они слышатся (фонетически), в ущерб тому, как они должны быть записаны (орфографически). TER в экспериментах всегда выше, чем WER. Это говорит о том, что предметная лексика хуже распознается моделями, чем общая, так как специфические термины гораздо реже встречаются в обучающих данных.

Модифицированные модели показывают значения TER ниже, чем модели общего назначения. Далее приводятся примеры словосочетаний из предметной области и варианты их ошибочного распознавания моделями общего назначения:

- Versicharge – versu charge, versus charge;
- Siemens eMobility – siemen sima bility, simons immobility, simon see mobility;
- Evocharge – eva charge, eve charge, evil charge и т.п.

На этих примерах видно, что для разных узкоспециализированных терминов и имен собственных модели общего назначения склонны выдавать различные вариации общеупотребительных слов и словосочетаний. Модифицированные же модели при распознавании терминов предметной области склонны чаще возвращать их орфографически правильную форму. Также, по эмпирическим наблюдениям, снижается вариативность распознаваний терминов, т. е. уменьшается разнообразие возвращаемых моделью словоформ, что положительно влияет на возможность использования методов постобработки распознанного текста.

**Результаты исследования.** Анализ применения средств распознавания речи в такой области, как энергетика, показывает необходимость специального обучения моделей распознаванию специализированной лексики. При этом традиционный способ улучшения качества моделей распознавания, предполагающий сбор сотен часов акустических данных и их ручную разметку для дальнейшего обучения моделей общего назначения, негативно влияет на стоимость и сроки внедрения информационных систем. Также имеют значение вопросы конфиденциальности, ограничивающие доступ к такой информации.

Предложенный метод заключается в использовании для обучения распознаванию тематической лексики наборов данных с открытым доступом путем поиска и выделения из них семплов, семантически близких предметной области, для последующего обучения моделей общего назначения. В процессе исследования были выбраны и испытаны программные библиотеки и технологии с открытым доступом, обеспечивающие возможность создания обучающей выборки для сферы энергетики. Результаты экспериментов показали, что получение такой выборки занимает несколько дней работы на одном типовом компьютере.

Применение метода позволяет:

1) улучшить качество распознавания терминов предметной области и снизить их вариативность;

2) использовать только общедоступные данные для улучшения качества распознавания специализированной лексики;

3) использовать полученную модель в качестве инициализирующей для дальнейшей тонкой настройки на закрытых данных;

4) уменьшить объем закрытых наборов данных, необходимых для дальнейшей тонкой настройки.

Разработанная на основе метода прикладная модель продемонстрировала высокий уровень распознавания терминов на русском и английском языках без дополнительного обучения на специально подготовленных вручную наборах данных.

**Выводы.** Разработанный метод создания моделей распознавания речи позволяет существенно упростить и ускорить процесс обучения распознаванию специализированной профессиональной лексики за счет использования размеченных данных из открытых источников, отобранных с применением методов те-

матического семплирования. Испытания предложенного метода при создании модели для объектов энергетики подтвердили его эффективность. Результаты исследования могут применяться при разработке информационных систем в области проектирования и эксплуатации объектов энергетики и энергетического оборудования.

### Список литературы


1. **Attention** is all you need / A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, et al. // Advances in neural information processing systems. – 2017. – Vol. 30.
2. **Transformer** transducer: A streamable speech recognition model with transformer encoders and RNN-T loss / Q. Zhang, H. Lu, H. Sak, et al. // ICASSP 2020–2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – IEEE, 2020. – P. 7829–7833.
3. **Li J.** Recent advances in end-to-end automatic speech recognition // APSIPA Transactions on Signal and Information Processing. – 2022. – Vol. 11. – No. 1.
4. **Невлюдов И.Ш., Цымбал А.М., Милютина С.С.** Использование искусственной нейронной сети в подсистеме ввода голосовой информации САПР ТП роботизированного производства // Радиоэлектроника и информатика. – 2007. – № 1. – С. 56–61.
5. **Saon G., Chien J.T.** Large-vocabulary continuous speech recognition systems: A look at some recent advances // IEEE signal processing magazine. – 2012. – Vol. 29, No. 6. – P. 18–33.
6. **Deep** contextualized acoustic representations for semi-supervised speech recognition / S. Ling, Y. Liu, J. Salazar, K. Kirchhoff // ICASSP 2020-2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – IEEE, 2020. – P. 6429–6433.
7. **Audiolm:** a language modeling approach to audio generation / Z. Borsos, R. Marinier, D. Vincent, et al. // arXiv preprint arXiv:2209.03143. – 2022.
8. **Russian** open speech to text (stt/asr) dataset (2022) / A. Slizhikova, A. Veysov, D. Nurtdinova, et al. https://github.com/snakers4/open_stt/
9. **Gigaspeech:** An evolving, multi-domain asr corpus with 10,000 hours of transcribed audio / G. Chen, S. Chai, G. Wang, et al. // arXiv preprint arXiv:2106.06909. – 2021.
10. **Librispeech:** an asr corpus based on public domain audio books / V. Panayotov, G. Chen, D. Povey, S. Khudanpur // 2015 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP). – IEEE, 2015. – С. 5206–5210.
11. **Common** voice: A massively-multilingual speech corpus / R. Ardila, M. Branson, K. Davis, et al. // arXiv preprint arXiv:1912.06670. – 2019.
12. **Mls:** A large-scale multilingual dataset for speech research / V. Pratap, Q. Xu, A. Sriram, et al. // arXiv preprint arXiv:2012.03411. – 2020.
13. **Munich** Artificial Intelligence Laboratories GmbH. The m-ailabs speech dataset. https://www.caito.de/2019/01/the-m-ailabs-speech-dataset/, 2017.
14. **The multilingual** tedx corpus for speech recognition and translation / E. Salesky, M. Wiesner, J. Bremerman, et al. // arXiv preprint arXiv:2102.01757. – 2021.
15. **Voxpopuli:** A large-scale multilingual speech corpus for representation learning, semi-supervised learning and interpretation / C. Wang, M. Rivière, A. Lee, et al. // arXiv preprint arXiv:2101.00390. – 2021.
16. **VoxForge**, Free Speech Recognition. www.voxforge.org, 2022.
17. **Mpnet:** Masked and permuted pre-training for language understanding / K. Song, X. Tan, T. Qin, et al. // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2020. – Т. 33. – С. 16857–16867.
18. **McInnes L., Healy J., Melville J.** Umap: Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction // arXiv preprint arXiv:1802.03426. – 2018.
19. **McInnes L., Healy J.** Accelerated hierarchical density based clustering // 2017 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW). – IEEE, 2017. – С. 33–42.
20. **Grootendorst M.** BERTopic: Neural topic modeling with a class-based TF-IDF procedure // arXiv preprint arXiv:2203.05794. – 2022.
21. **Nemo:** a toolkit for building ai applications using neural modules / O. Kuchaiev, J. Li, H. Nguyen, et al. // arXiv preprint arXiv:1909.09577. – 2019.
22. **Citrinet:** Closing the gap between non-autoregressive and autoregressive end-to-end models for automatic speech recognition / S. Majumdar, J. Balam, O. Hrinchuk, et al. // arXiv preprint arXiv:2104.01721. – 2021.
23. **Conformer:** Convolution-augmented transformer for speech recognition / A. Gulati, J. Qin, C. Chiu, et al. // arXiv preprint arXiv:2005.08100. – 2020.
24. **Student's** t-test. Dependent t-test for paired samples. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/T-test#Dependent_t-test_for_paired_samples (дата обращения: 01.02.2023).


### References


1. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A.N., Kaiser, Ł., Polosukhin, I. Attention is all you need. Advances in neural information processing systems, 2017, vol. 30.
2. Zhang, Q., Lu, H., Sak, H., Tripathi, A., McDermott, E., Koo, S., Kumar, Sh. Transformer transducer: A streamable speech recognition model with transformer encoders and RNN-T loss. ICASSP 2020–2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2020, pp. 7829–7833.
3. Li, J. Recent advances in end-to-end automatic speech recognition. APSIPA Transactions on Signal and Information Processing, 2022, vol. 11, no. 1.
4. Nevlyudov, I.S., Cymbal, A.M., Milyutina, S.S. Ispol'zovanie iskusstvennoj nejronnoj seti v podsisteme vvoda golosovoj informacii SAPR TP robotizirovannogo proizvodstva [Application of artificial neural network in the subsystem of entering voice information of CAD TP of robotic production]. *Radioelektronika i informatika*, 2007, no. 1, pp. 56–61.
5. Saon, G., Chien, J.T. Large-vocabulary continuous speech recognition systems: A look at some recent advances. IEEE signal processing magazine, 2012, vol. 29, no. 6, pp. 18–33.
6. Ling, S., Liu, Y., Salazar, J., Kirchhoff, K. Deep contextualized acoustic representations for semi-supervised speech recognition. ICASSP 2020–2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2020, pp. 6429–6433.

7. Borsos, Z., Marinier, R., Vincent, D., Kharitonov, E., Pietquin, O., Sharifi, M., Teboul, O., Grangier, D., Tagliasacchi, M., Zeghidour, M. Audiolm: a language modeling approach to audio generation. arXiv preprint arXiv:2209.03143. 2022.

8. Slizhikova, A., Veysov, A., Nurtdinova, D., Voronin, D., Baburov, Y. Russian open speech to text (stt/asr) dataset (2022). URL: https://github.com/snakers4/open_stt/

9. Chen, G., Chai, S., Wang, G., Du, J., Zhang, W., Weng, C., Su, D., Povey, D., Trma, J., Zhang, J., Jin, M., Khudanpur, S., Watanabe, S., Zhao, S., Zou, W., Li, X., Yao, X., Wang, Y., Wang, Y., You, Z., Yan, Z. Gigaspeech: An evolving, multi-domain asr corpus with 10,000 hours of transcribed audio. arXiv preprint arXiv:2106.06909. 2021.

10. Panayotov, V., Chen, G., Povey, D., Khudanpur, S. Librispeech: an asr corpus based on public domain audio books. 2015 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP). IEEE, 2015, pp. 5206–5210.

11. Ardila, R., Branson, M., Davis, K., Henretty, M., Kohler, M., Meyer, J., Morais, R., Saunders, L., Tyers, F., Weber, G. Common voice: A massively-multilingual speech corpus. arXiv preprint arXiv:1912.06670. 2019.

12. Pratap, V., Xu, Q., Sriram, A., Synnaeve, G., Collobert, R. Mls: A large-scale multilingual dataset for speech research. arXiv preprint arXiv:2012.03411. 2020.

13. Munich Artificial Intelligence Laboratories GmbH. The m-ailabs speech dataset. https://www.caito.de/2019/01/the-m-ailabs-speech-dataset/, 2017.

14. Salesky, E., Wiesner, M., Bremerman, J., Cattoni, R., Negri, M., Turchi, M., Oard, D., Post, M. The multilingual tedx corpus for speech recognition and translation. arXiv preprint arXiv:2102.01757. 2021.

15. Wang, C., Rivière, M., Lee, A., Wu, A., Talnikar, C., Haziza, D., Williamson, M., Pino, J., Dupoux, E. Voxpopuli: A large-scale multilingual speech corpus for representation learning, semi-supervised learning and interpretation. arXiv preprint arXiv:2101.00390. 2021.

16. VoxForge, Free Speech Recognition. www.voxforge.org, 2022.

17. Song, K., Tan, X., Qin, T., Lu, J., Liu, T. Mpnet: Masked and permuted pre-training for language understanding. Advances in Neural Information Processing Systems, 2020, vol. 33, pp. 16857–16867.

18. McInnes, L., Healy, J., Melville, J. Umap: Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction. arXiv preprint arXiv:1802.03426. 2018.

19. McInnes, L., Healy, J. Accelerated hierarchical density based clustering. 2017 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW). IEEE, 2017, pp. 33–42.

20. Grootendorst, M. BERTopic: Neural topic modeling with a class-based TF-IDF procedure. arXiv preprint arXiv:2203.05794. 2022.

21. Kuchaiev, O., Li, J., Nguyen, H., Hrinchuk, O., Leary, R., Ginsburg, B., Kriman, S., Beliaev, S., Lavrukhin, V., Cook, J., Castonguay, P., Popova, M., Huang, J., Cohen, J. Nemo: a toolkit for building ai applications using neural modules. arXiv preprint arXiv:1909.09577. 2019.

22. Majumdar, S., Balam, J., Hrinchuk, O., Lavrukhin, V., Noroozi, V., Ginsburg, B. Citrinet: Closing the gap between non-autoregressive and autoregressive end-to-end models for automatic speech recognition. arXiv preprint arXiv:2104.01721. 2021.

23. Gulati, A., Qin, J., Chiu, C., Parmar, N., Zhang, Y., Yu, J., Han, W., Wang, S., Zhang, Z., Wu, Y., Pang, R. Conformer: Convolution-augmented transformer for speech recognition. arXiv preprint arXiv:2005.08100. 2020.

24. Student's t-test. Dependent t-test for paired samples. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/T-test#Dependent_t-test_for_paired_samples (access date: 01.02.2023).

**ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Выпуск 4**

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 08.08.2023. Выход в свет 31.08.2023. Формат 60x84 $^{1}/_{8}$.
Усл. печ. л. 11,62. Уч.-изд. л. 12,4. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции и издательства: Ивановский государственный энергетический университет, 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
Типография ООО «ПресСто»: 153025, Ивановская обл., г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, строение 8.

Индекс 18079




АДРЕС: ИВАНОВО, УЛ. РАБФАКОВСКАЯ, 34
ТЕЛ.: (4932) 32-72-43
(4932) 26-98-57
ФАКС: (4932) 38-57-01
E-MAIL: OFFICE@ISPU.RU