

Известия вузов. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Журнал выходит на русском языке с января 1999 года

Периодичность - 6 раз в год (сдвоенными номерами)

Главный редактор	АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю.
Второй главный редактор	АХМЕТОВА И.Г.
Заместитель главного редактора	STANIMIR VALTCHEV
Научный редактор тематического выпуска	ГРАЧЕВА Е.И.
Научный редактор	КАЛИНИНА М.В.
Редактор	ВАЛЕЕВА С.Н.

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ,
ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Свидетельство о регистрации СМИ:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)- ПИ ФС 77-83199 от 31.03.2022г.
Подписка:	Каталог интернет - подписки «Почта России» - индекс П6740
Сайт:	https://www.energyret.ru/
Издатель:	Казанский государственный энергетический университет
Адрес издателя:	420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Адрес редакции:	420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Тел./факс:	+7 (843) 527-92-76
Email:	problems_ener@mail.ru
Типография:	ООО "ФОЛИАНТ"
Адрес типографии:	420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Профсоюзная, 17 в

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2023
Т.25, № 2
Март-Апрель

ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

В Журнале публикуются результаты открытых научных исследований, выполняемых учеными научных учреждений, высших учебных заведений, иных организаций и граждан, ведущих научные исследования в порядке личной инициативы. Язык публикаций: русский, английский.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ИВШИН И.В.	БРЯКИН И.В.	ЯКИМОВ Н.Д.
КАСИМОВ В.А.	СУСЛОВ К.В.	ІЛІҮА К. ІЛІЕҮ
ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В.	ФЕДОТОВ А.И.	ВАФИН Д.Б.
ДОВГУН В.П.	ЗВЕРЕВА Э.Р.	ІОН V ІОН
ГРАЧЕВА Е.И.	ЩИННИКОВ П.А.	НИКОЛАЕВА Л.А.
ИЛЮШИН П.В.	МИНГАЛЕЕВА Г.Р.	КАЛАЙДА М.Л.
САФИН А.Р.	ВАНЬКОВ Ю.В.	БОРИСОВ А.В.
МЕЩЕРЯКОВ В.Н.	АРАКЕЛЯН Э.К.	АНДРЕЕВ В.П.
STANIMIR VALTCHEV	ПАВЛОВ Г.И.	КОРНИЛОВ В.Ю.
PENTIUC RADU DUMITRU	ДМИТРИЕВ А.В.	КОЗЕЛКОВ О.В.
KOLCUN MICHAEL	БОРУШ О.В.	
БОЧКАРЕВ И.В.	ЛАПТЕВ А.Г.	

Свидетельство о регистрации СМИ:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) – ПИ ФС 77-83199 от 31.03.2022г.

PROCEEDINGS OF THE HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. ENERGY SECTOR PROBLEMS

SCIENTIFIC &
TECHNICAL JOURNAL

2023
Vol. 25, № 2
March-April

ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

**Founder: Kazan State Power Engineering University and the Ministry of
Education of the Russian Federation**

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief:

ABDULLAZYANOV EDVARD YUNUSOVICH

Second Editor in Chief: AKHMETOVA IRINA GAREEVNA

Deputy Chief Editor: STANIMIR VALTCHEV

The Journal publishes the results of open scientific research carried out by scientists of scientific institutions, higher educational institutions, other organizations and citizens conducting research in the form of a personal initiative. The following materials are accepted for publication: original articles; scientific reviews; reviews; short messages; reference materials. Language of publications: Russian, English.

Sections:

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

METHODS AND DEVICES OF CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS,

SUBSTANCES AND THE NATURAL ENVIRONMENT

ELECTRICITY

ECOLOGICAL SAFETY

Editorial board:

IGOR IVSHIN

VASIL KASIMOV

GOLENISHCHEV-KUTUZOV ALEXANDER

DOVGUN VALERY

GRACHEVA ELENA

ILYUSHIN PAVEL

SAFIN ALFRED

MESHCHERYAKOV VIKTOR

STANIMIR VALTCHEV

PENTIUC RADU DUMITRU

KOLCUN MICHAIL

BOCHKAREV IGOR

BRIAKIN IVAN

SUSLOV KONSTANTIN

FEDOTOV ALEXANDER

ZVEREVA ELVIRA

SHCHINNIKOV PAVEL

MINGALEEVA GUZEL

VANKOV YURY

ARAKELYAN EDIK

PAVLOV GRIGORY

DMITRIEV ANDREY

BORUSH OLESYA

LAPTEV ANATOLY

YAKIMOV NIKOLAY

ILIYA K. ILIEV

VAFIN DANIL

ION V ION

NIKOLAEVA LARISA

KALAI DA MARINA

BORISOV ANDREY

ANDREEV VICTOR

KORNILOV VLADIMIR

KOZELKOV OLEG

Address

Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Republic of Tatarstan,
Russian Federation

Tel./fax:

+7 (843) 527-92-76

Printing House:

LLC «FOLIANT»

Address of the printing house

420111, Republic of Tatarstan, g. Kazan, Str. Trade Union, 17 V

Email:

problems_ener@mail.ru

Site:

<https://www.energyret.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИВАНИЦКИЙ М.С. Массовые выбросы полициклических ароматических углеводородов при сжигании топлива в котлах ТЭС.	3
КРУПЕНЁВ Д.С., ПИСКУНОВА В.М., ГАЛЬФИНГЕР А.Г. Моделирование тепловых электростанций при исследовании надёжности энергоснабжения и энергетической безопасности.	12

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ДАДАБАЕВ Ш.Т., АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю., ГРАЧЕВА Е.И. Мероприятия по повышению технического ресурса электрооборудования мощных оросительных насосных станций.	26
МАЛЁВ Н.А. Синтез параметрически инвариантного следящего электропривода с применением метода восстановления параметров модели.	40
ВИНОГРАДОВ А.В., ЛАНСБЕРГ А.А., ВОЛЧКОВ Ю.Д., ВИНОГРАДОВА А.В. Определение современных показателей надёжности устройств релейной защиты и автоматики.	58
СУСЛОВ К.В., СОЛОНИНА Н.Н., СОЛОНИНА З.В., АХМЕТШИН А.Р. Эффективный метод определения места короткого замыкания в электрических сетях.	71
ГРАЧЕВА Е.И., АХМАД М-НАСЕР АЛЬЗАККАР., VALTCHEV S. Исследование температурных режимов элементов силовых трансформаторов на примере трансформаторов подстанции «Кабун-1» (Сирийская Арабская Республика).	84

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ЛЕВИН В.М., ПЕТУШКОВ П.А., ШВЕЦ М.А. Дистанционный мониторинг и управление состоянием трансформаторов в распределительных электрических сетях.	97
МУСТАФИН Р.Г., КАСИМОВ В.А. Применение технологии синхронизированных векторных измерений для выполнения функций релейной защиты.	110

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ,
ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

БАСЕНКО В.Р., ИВШИН И.В., ВЛАДИМИРОВ О.В., НИЗАМИЕВ М.Ф. Усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния силового трансформатора, основанный на фрактальном анализе амплитудно-временной характеристики.	124
БРЯКИН И.В., БОЧКАРЕВ И.В. Измерительное устройство для систем технической вибродиагностики энергетического оборудования.	137
ТАНЕЕВА А.В., ДМИТРИЕВА А.В., НОВИКОВ В.Ф. Особенности газохроматографического метода контроля содержания фенолов в водной среде.	153

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

АБИКЕНОВА А.А., ЖАНДАУЛЕТОВА Ф.Р., САНАТОВА Т.С., ОСТЕМИР Г.С. Исследование методов онлайн мониторинга параметров условий труда в АО «Алатау Жарык Компаниясь».	165
--	-----

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

БАДРЕТДИНОВА Г.Р., КАЛИМУЛЛИН И.Р., ЗИНУРОВ В.Э., ДМИТРИЕВ А.В. Оценка моделей турбулентности при внешнем обтекании нагреваемой трубы.	176
ПЛОТНИКОВ Л.В., РЫЖКОВ А.Ф., МЕДВЕДЕВ В.А., СМЕРНЫХ М.Д., ОСИПОВ Л.Е. Физическое моделирование аэродинамических характеристик потока в вертикальном диффузоре при подаче воздуха через разные конфигурации трубок.	187

C O N T E N T S

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

IVANITSKIY MS. Mass emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons during fuel combustion in thermal power plant boilers.	3
KRUPENEV DS, PISKUNOVA VM, GALFINGER AG. Modeling of thermal power plants in the study of reliability of power supply and energy security.	12

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

DADABAEV SHT, ABDULLAZYANOV EYU, GRACHEVA EI. Measures to increase the technical resource of electrical equipment of powerful irrigation pump stations.	26
MALEV NA. Synthesis of a parametrically invariant servo drive using the model parameters recovery method.	40
VINOGRADOV AV, LANSBERG AA, VOLCHKOV YU.D, VINOGRADOVA AV. Determination of modern reliability indicators of relay protection and automation devices.	58
SUSLOV KV, SOLONINA NN, SOLONINA ZV, AKHMETSHIN. AR. Operational determination of the point of a short circuit in power lines.	71
GRACHEVA EI, ALZAKKAR A, VALTCHEV S. Study of the temperature conditions of power transformers elements for example transformers at substation «Kabun-1» (Syrian Arab Republic).	84

ELECTRICITY

LEVIN VM, PETUSHKOV PA, SHVETS MA. Remote monitoring and control of the status of transformers in distribution electrical networks.	97
MUSTAFIN RG, KASIMOV VA. Use of synchronized vector measurements technology for perform relay protection functions.	110

METHODS AND DEVICES FOR CONTROLLING AND DIAGNOSING MATERIALS,
ARTICLES, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT

BASENKO VR, IVSHIN IV, VLADIMIROV OV, NIZAMIEV MF. Improved method for vibration control of the technical condition of a power transformer based on fractal analysis of the amplitude-time characteristics.	124
BRYAKIN IV, BOCHKAREV IV. Measuring device for systems of technical vibro-diagnosis of power equipment.	137
TANEEVA AV, DMITRIEVA AV, NOVIKOV VF. Features of the gas chromatographic method for monitoring the content of phenols in an aqueous medium.	153

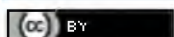
ECOLOGICAL SAFETY

ABIKENOVA AA, ZHANDAULETOVA FR, SANATOVA TS, OSTEMIR GS. Study of methods of on-line monitoring of parameters of working conditions in JSC «Alatau Zharyk Company».	165
--	-----

THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

BADRETDINOVA GR, KALIMULLIN IR, ZINUROV VE, DMITRIEV AV. Evaluation of turbulence models in the external flow around the heated pipe.	176
PLOTNIKOV LV, RYZHKOV AF, MEDVEDEV VA, SMIRNYKH MD, OSIPOV LE. Physical simulation of aerodynamic flow characteristics in a vertical diffuser with air supply through different pipe configurations.	187

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 621.311.22

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-2-3-11

МАССОВЫЕ ВЫБРОСЫ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА В КОТЛАХ ТЭС

Иваницкий М.С.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Волжском, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-8779-5453>, mseiv@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ данного исследования заключается в установлении технологических показателей выбросов бенз(а)пирена в атмосферу для оценки степени негативного влияния энергетических предприятий на окружающую среду и разработке на этой основе первичных (воздухоохранных) мероприятий, проведении инвентаризации выбросов загрязняющих веществ, сбора и подготовке исходной экологической информации для эффективной реализации в отечественной теплоэнергетике принципов технологического нормирования выбросов. ЦЕЛЬ. Рассмотрены технологические особенности образования полициклических ароматических углеводородов, в частности бенз(а)пирена, в топках энергетических котлов, сжигающих органическое топливо. Определены режимные факторы, значительно влияющие на интенсивность образования бенз(а)пирена как наиболее канцерогенной и мутагенной примеси в дымовых газах. В рамках внедрения принципов технологического нормирования загрязняющих маркерных веществ энергетические предприятия должны определять массовую эмиссию высокотоксичных продуктов сгорания для улучшения экологических показателей топочных процессов и установления технологических показателей выбросов. МЕТОДЫ. Определение массовых выбросов полициклических ароматических углеводородов выполнено с применением методов математической статистики, обработки экологической информации, системного анализа данных и обработки полученных результатов. РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработаны аналитические выражения для определения содержания бенз(а)пирена в продуктах сгорания каменного угля и антрацита. Определены значения массовых выбросов бенз(а)пирена для проведения инвентаризации и обоснования технологического нормирования канцерогенных и мутагенных веществ на энергетических предприятиях. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Полученные результаты рекомендуется использовать для предварительной оценки содержания бенз(а)пирена в дымовых газах котлов на энергетических предприятиях на стадии сбора и подготовки информации для введения технологического нормирования высокотоксичных веществ и оценки технологических показателей выбросов.

Ключевые слова: тепловые электрические станции; технологическое нормирование выбросов; полициклические ароматические углеводороды; бенз(а)пирен; массовые выбросы.

Для цитирования: Иваницкий М.С. Массовые выбросы полициклических ароматических углеводородов при сжигании топлива в котлах ТЭС // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.25. № 2. С.3-11. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-3-11.

MASS EMISSIONS OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS DURING FUEL COMBUSTION IN THERMAL POWER PLANT BOILERS

MS. Ivanitskiy

Volzhsy Branch of the National Research University

«Moscow Power Engineering Institute», Russia
ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-8779-5453>, mseiv@yandex.ru

Abstract: *RELEVANCE* of this study lies in the establishment of technological indicators of emissions of benz(a)pyrene into the atmosphere to assess the degree of negative impact of energy enterprises on the environment and the development on this basis of primary (air protection) measures, inventory of emissions of pollutants, collection and preparation of initial environmental information for the effective implementation of the principles of technological regulation of emissions in the domestic thermal power industry. *THE PURPOSE.* The technological features of the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons, in particular benz(a)pyrene, in the furnaces of power boilers burning organic fuel are considered. The regime factors significantly influencing the intensity of the formation of benz(a)pyrene as the most carcinogenic and mutagenic impurity in flue gases have been determined. As part of the implementation of the principles of technological rationing of polluting marker substances, energy enterprises should determine the mass emission of highly toxic combustion products to improve the environmental performance of combustion processes and establish technological emission indicators. *METHODS.* Determination of mass emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons was carried out using methods of mathematical statistics, processing of environmental information, system analysis of data and processing of the results obtained. *RESULTS.* Analytical expressions have been developed to determine the content of benz(a)pyrene in the combustion products of coal and anthracite. The values of mass emissions of benz(a)pyrene for inventory and justification of technological rationing of carcinogenic and mutagenic substances at energy enterprises have been determined. *CONCLUSION.* The results obtained are recommended to be used for a preliminary assessment of the content of benz(a)pyrene in the flue gases of boilers at power plants at the stage of collecting and preparing information for the introduction of technological rationing of highly toxic substances and the assessment of technological emission indicators.

Keywords: *thermal power plants; benz(a)pyrene; technological regulation of emissions; polycyclic aromatic hydrocarbons; mass emissions.*

For citation: Ivanitskiy MS. Mass emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons during fuel combustion in thermal power plant boilers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(2): 3-11. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-3-11.

Введение

В отечественной теплоэнергетике до 2024 года запланирована реализация новой концепции природоохранной деятельности, основанной на технологическом нормировании загрязняющих выбросов в атмосферный воздух и внедрении на энергетических предприятиях наилучших доступных технологий (НДТ). В соответствии с данным подходом энергетические предприятия по степени отрицательного воздействия на атмосферный воздух разделены на IV категории. В рамках реализации принципов технологического нормирования к объектам I категории со значительным негативным воздействием отнесено порядка 300 энергетических предприятий, которые должны определять нормативы допустимых выбросов высокотоксичных веществ, веществ характеризующихся канцерогенными и мутагенными свойствами, например, некоторые представители полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), а также обеспечить непрерывный контроль выбросов вредных (загрязняющих) веществ для каждого источника загрязнения атмосферы. Вместе с тем, согласно задачам выполнения национального проекта «Экология» снижение негативного воздействия на окружающую среду является приоритетным направлением развития и совершенствования энергетической отрасли [1].

В работах [1, 2] рассматриваются технические и экономические проблемы, а также возможные риски, возникающие при внедрении НДТ на российских тепловых электрических станциях. Предложено использование норм общего действия для более комплексной оценки негативного влияния вредных выбросов энергетических предприятий на окружающую среду. Обоснована необходимость практической реализации НДТ на объектах энергетики с учетом полученного практического опыта применения различных способов сжигания органического топлива и эксплуатации высокоэффективных газоочистных установок и систем.

В работе [3, 4] приведены методические подходы для установления энергетическими предприятиями технологических показателей выбросов в условиях реализации принципов технологического нормирования и внедрения наилучших доступных технологий, а также уточнения регламентных требований реализации принципов технологического нормирования и выбора НДТ на энергетических предприятиях.

Образование ПАУ, в том числе бенз(а)пирена (БП) при сжигании твердого топлива в основном объясняется наличием технологических условий, характеризующихся низкой температурой процесса горения органического топлива и недостатком подвального воздуха. Расчет выбросов БП в дымовых газах котлов паропроизводительностью 30 т/ч и более выполняется на основе нормативной методики СО 153-34.02.316-2003. При этом расчетная оценка эмиссии БП учитывает влияние режимных факторов и теплотехнических характеристик органического топлива. В связи с этим при определении выбросов БП учитывается влияние коэффициента избытка воздуха, нагрузка котла, режимно-технологические характеристики и параметры топочного процесса, а также степень задержки БП газоочистных аппаратах. Погрешность определения выбросов БП составляет 20 %.

В работах [5, 6] представлены результаты применения методики аналитического определения полициклических ароматических углеводородов в газовых пробах. Описаны технологические условия отбора пробы, а также проблемы индикации и другие сложности детектирования примесей представителей ПАУ в газовой пробе при сжигании органического топлива в топках котлов различной тепловой мощности. Следует отметить, что в силу имеющихся сложностей проведения аналитического контроля содержание БП в продуктах сгорания на ТЭС используются методы расчетного определения массовых выбросов высокотоксичных веществ.

Системы технологического контроля и учета выбросов предполагает наличие возможности сбора данных о массовых выбросах в атмосферу продуктов сгорания, поиска технологических решений, направленных на оптимизацию процесса сжигания топлива, улучшения экологических показателей топочных процессов, снижения воздействия на атмосферный воздух вредных выбросов тепловых электрических станций. Даны рекомендации по выбору компонентов газоаналитических систем для организации непрерывного мониторинга выбросов на энергетических предприятиях [7, 8].

Результаты анализа показывают, что при определении степени негативного влияния энергетических предприятий на окружающую среду необходимо учитывать токсичность дымовых газов. Для оценки токсичности компонентов сгорания топлива на практике используется показатель суммарной вредности дымовых газов. Следует отметить, что при определении суммарной токсичности продуктов сгорания не учитывается вклад канцерогенных представителей ПАУ, оказывающих отрицательное воздействие на атмосферный воздух. При этом содержание отдельных представителей ПАУ в уходящих газах свидетельствует о незавершенности процессов горения органического топлива [9]. Исследование влияния загрязнения канцерогенными веществами, образующимися при сжигании топлива, окружающей среды необходимо проводить с учетом массы и частной вредности продуктов сгорания. Необходимо отметить, что на интенсивность образования ПАУ в процессе сжигания органического топлива значительное влияние оказывают режимно-технологические факторы, тип горелочного устройства и способ повода окислителя.

Таким образом, целью работы является расчетная оценка концентраций и массовых выбросов полициклических ароматических углеводородов, в основном представленных бенз(а)пиреном, для оценки степени негативного влияния энергетических предприятий на окружающую среду и разработки первичных (воздухоохранных) мероприятий, инвентаризации выбросов загрязняющих веществ, сбора и подготовки исходной экологической информации для установления технологических показателей БП в атмосферу.

Теоретическая значимость исследований заключается в том, что разработаны аналитические выражения для расчета концентраций БП в дымовых газах котлов при сжигании каменного угля и антрацита, оценки массовых выбросов полициклических ароматических углеводородов, представленных БП, в атмосферу.

Практическая значимость полученных результатов могут быть применены на тепловых электрических станциях на этапе сбора и подготовки исходной экологической информации для обоснования технологических показателей высокотоксичных примесей в продуктах сгорания каменного угля и антрацита в энергетических котлах большой тепловой мощности для оценки степени негативного влияния объектов энергетики на окружающую среду и разработки природоохранных мероприятий, в том числе на стадии подготовки заявки и получения комплексного экологического разрешения.

Обобщение экспериментальных данных показывает, что при сжигании природного газа концентрация БП в дымовых газах соответствует 40 – 50 нг/м³, в условиях сжигания угля традиционным способом находится на уровне 100 – 120 нг/м³. На рисунке 1 представлена зависимость влияния содержания СО на концентрацию БП в продуктах сгорания природного газа.

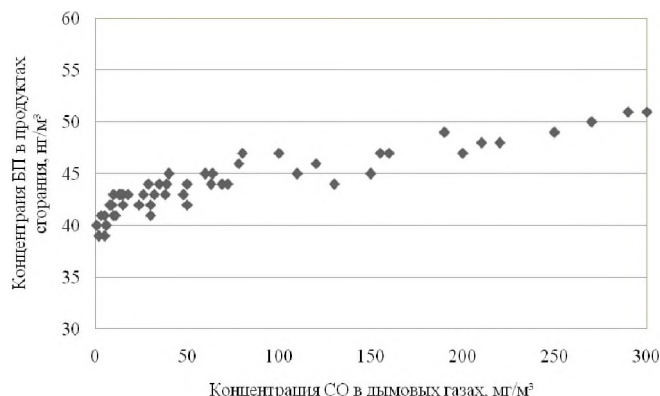


Рис. 1. Изменение концентрации БП в зависимости от содержания СО в дымовых газах (в сечении за дымососом) *Fig. 1. Change in BP concentration depending on the CO content in flue gases (in the section behind the smoke pump)*

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Анализ показывает, что между содержанием БП и СО в продуктах сгорания наблюдается корреляционная прямая зависимость, как это показано на рисунке 1. На рисунке 2 представлен график изменения содержания БП в дымовых газах от концентрации СО (в контрольном сечении) в продуктах сгорания.

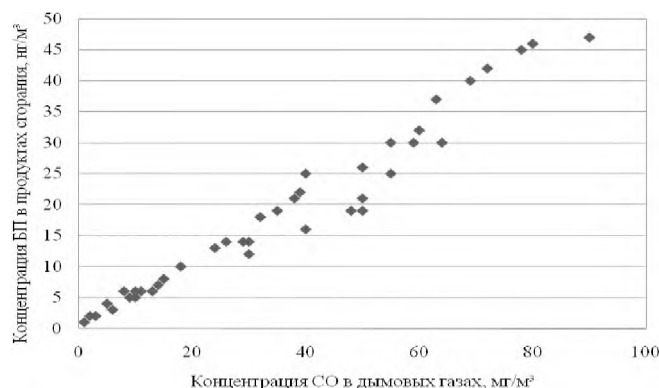


Рис. 2. Изменение содержания БП в дымовых газах от значения концентрации СО (в контрольном сечении) в продуктах сгорания *Fig. 2. Change of BP content in flue gases from the value of CO concentration (in the control section) in combustion products*

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Превышение значений эмиссии БП в продуктах сгорания по сравнению с результатами, приведенными на рисунках 1 и 2, свыше 200 нг/м³ может быть связано, в первую очередь, с конкретными условиями сжигания топлива, и в меньшей степени с его теплотехническими характеристиками. Реализация первичных (воздухоохранных) мероприятий на котельных установках способствует росту БП в дымовых газах в 5 – 6 раз по сравнению с исходными значениями. При оценке массовых выбросов БП следует также учитывать эффективность работы газоочистных систем, которая может вносить значительный вклад в достоверность их определения [10 – 14].

Материалы и методы

Концентрация БП в продуктах сгорания органического топлива с учетом взаимного влияния коэффициента избытка воздуха α и паропроизводительности D энергетического котла можно представить в виде уточненной корреляционно-регрессионной зависимости [15]:

$$c_{\text{БП}} = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ik} X_i X_k + \sum b_{ii} X_i^2 + \sum b_{ik} X_{ik}^2, \quad (1)$$

где b_0, b_i, b_{ii}, b_{ik} – коэффициенты регрессии, X_{ii}, X_{ik} – факторные значения.

Статистические коэффициенты в уравнении (1) определяются по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N C_{\text{БП}_j} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n b_{ii} \sum_{j=1}^N X_{ij}^2; \quad (2)$$

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ji} C_{\text{БП}_j}}{\sum_{j=1}^N X_{ji}^2}; \quad b_{ii} = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ji}^* C_{\text{БП}_j}}{\sum_{j=1}^N X_{ji}^{*2}}; \quad b_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ji} X_{jk} C_{\text{БП}_j}}{\sum_{j=1}^N X_{ji}^2 X_{jk}^2} \quad (i \neq k).$$

По результатам расчета коэффициентов регрессии выполнена проверка их значимости и воспроизводимости путем использования статистических критериев Стьюдента и Кохрена. Для проверки адекватности корреляционно-регрессионной зависимости применен критерий Фишера.

$$\text{Кодированные значения факторов равны } X_1 = \frac{\alpha_i - \bar{\alpha}}{\alpha_{\max} - \bar{\alpha}}, \quad X_2 = \frac{D_i - \bar{D}}{D_{\max} - \bar{D}},$$

соответственно, здесь α_i, D_i – фактические (текущие) значения режимных факторов; $\bar{\alpha}, \bar{D}$ – средние значения режимных факторов в диапазоне $\alpha_{\min} \leq \alpha_i \leq \alpha_{\max}$, $D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max}$; $\alpha_{\max}, D_{\max}$ – максимальные значения режимных факторов котельной установки $\alpha_{\min} \leq \alpha_i \leq \alpha_{\max}$, $D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max}$.

Обсуждение результатов

На основе обобщения опытных данных о содержании БП в дымовых газах энергетических котлов при сжигании органического топлива определены значения выбросов для расчетных точек факторных эксперимента [5, 6, 9]. Путем обработки полученных данных и использования методического подхода факторного эксперимента, матрицы планирования численного эксперимента, разработаны адекватные регрессионные соотношения для расчета содержания БП в продуктах сгорания каменного угля (Кузнецкий Т) и антрацита (Донецкий АШ).

Концентрация бенз(а)пирена, нг/м^3 , в дымовых газах котлов большой мощности (300 МВт и более) при сжигании каменного угля (Кузнецкий Т), приведенная к коэффициенту избытка воздуха $\alpha = 1,4$ рассчитывается по формуле:

$$c_{\text{БП}} = 233 - 16 \cdot \left(\frac{\alpha_i - \bar{\alpha}}{\alpha_{\max} - \bar{\alpha}} \right) - 15 \cdot \left(\frac{D_i - \bar{D}}{D_{\max} - \bar{D}} \right) + 35 \cdot \left(\frac{\alpha_i - \bar{\alpha}}{\alpha_{\max} - \bar{\alpha}} \right) \cdot \left(\frac{D_i - \bar{D}}{D_{\max} - \bar{D}} \right) - \left(\frac{D_i - \bar{D}}{D_{\max} - \bar{D}} \right)^2. \quad (3)$$

Уравнение регрессии (3) позволяет адекватно оценивать $c_{\text{БП}}$ для значений α в пределах $1,1 \leq \alpha \leq 1,3$, величин D в диапазоне $294 \leq D \leq 420 \text{ т/ч}$.

Концентрация бенз(а)пирена, нг/м^3 , в дымовых газах котлов большой мощности (300 МВт и более) при сжигании антрацита (Донецкий АШ), приведенная к коэффициенту избытка воздуха $\alpha = 1,4$ рассчитывается по формуле:

$$c_{\text{БП}} = 264 - 21 \cdot \left(\frac{\alpha_i - \bar{\alpha}}{\alpha_{\max} - \bar{\alpha}} \right) - 25 \cdot \left(\frac{D_i - \bar{D}}{D_{\max} - \bar{D}} \right) + 40 \cdot \left(\frac{\alpha_i - \bar{\alpha}}{\alpha_{\max} - \bar{\alpha}} \right) \cdot \left(\frac{D_i - \bar{D}}{D_{\max} - \bar{D}} \right) + 3,5 \cdot \left(\frac{D_i - \bar{D}}{D_{\max} - \bar{D}} \right)^2. \quad (4)$$

Уравнение регрессии (4) позволяет адекватно оценивать $c_{\text{БП}}$ для значений α в пределах $1,05 \leq \alpha \leq 1,25$, величин D в диапазоне $570 \leq D \leq 950 \text{ т/ч}$.

Относительная погрешность расчетной оценки $C_{\text{бп}}$ в дымовых газах котлов на основе регрессионной зависимости (3) соответствует 13,6 %, по выражению (4) составляет 10,5 %, что значительно меньше погрешности нормативной методики.

Максимальный выброс бенз(а)пирена (г/с), поступающий в атмосферу с дымовыми газами энергетических котлов определяется по соотношению:

$$M_{\text{бп}} = c_{\text{бп}} V_{\text{г}}^p \quad (5)$$

где $V_{\text{г}}^p$ – реальный объем выбросов дымовых газов, измеренный в сечении газохода после дымососа или рассчитанный по составу топлива при рабочих условиях и работе котла на максимальной тепловой нагрузке, м³/с.

На рисунке 3 представлена сравнительная графическая зависимость изменения $C_{\text{бп}}$ в дымовых газах при горении каменного угля (Кузнецкий Т) и антрацита (Донецкий АШ) для различных вариантов сжигания топлива и значений паровой нагрузки котельных установок.

Следует отметить, что результаты расчетной оценки $C_{\text{бп}}$ для исследуемых видов каменного угля (Кузнецкий Т) и антрацита (Донецкий АШ), на основе соотношений (3), (4) удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [5, 6, 9].

Анализ полученных результатов показал, что $C_{\text{бп}}$ в дымовых газах парового котла ТП-87 при использовании каменного угля (Кузнецкий Т) и номинальной паровой нагрузке в диапазоне α соответствует 237 – 321 нг/м³. $C_{\text{бп}}$ в продуктах сгорания котельной установки ТПП-210, сжигающего антрацит (Донецкий АШ) при аналогичных условиях соответствует диапазону значений 291 – 393 нг/м³, как это представлено на рисунке 3.

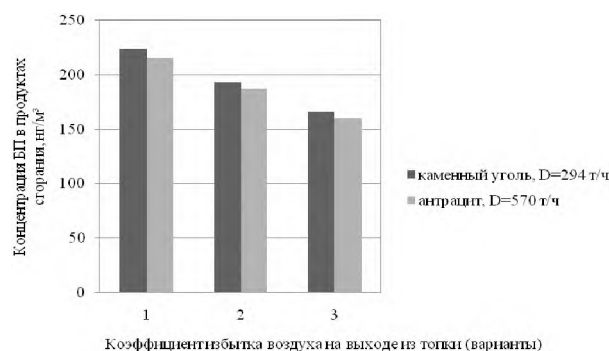


Рис. 3. Содержание бенз(а)пирена в продуктах сгорания каменного угля (Кузнецкий Т) и антрацита (Донецкий АШ) а) при работе котлов на частичной нагрузке

Fig. 3. The content of benz(a)pyrene in the combustion products of coal (Kuznetsky T) and anthracite (Donetsk ASH) a) when the boilers are under partial load

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

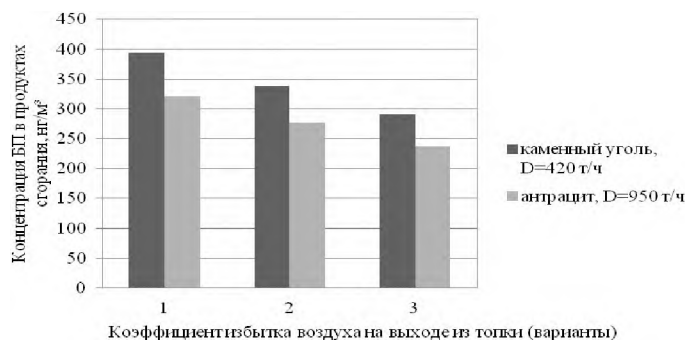


Рис. 3. Содержание бенз(а)пирена в продуктах сгорания каменного угля (Кузнецкий Т) и антрацита (Донецкий АШ) б) при работе котлов на номинальной нагрузке 1 вариант – 1,05 – 1,1; 2 вариант – 1,15 – 1,2; 3 вариант – 1,25 – 1,3

Fig. 3. The content of benz(a)pyrene in the combustion products of coal (Kuznetsky T) and anthracite (Donetsk ASH) b) When the boilers are at rated load 1 option 1.05 1.1; 2 option 1.15 1.2; 3 option 1.25 1.3

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

При сжигании каменного угля (Кузнецкий Т) с теплотехническими характеристиками $A^H = 0,92(\% \cdot \text{кг})/\text{МДж}$, $W^H = 0,44(\% \cdot \text{кг})/\text{МДж}$, $N^P = 1,5\%$, $V^{daf} = 14\%$, $Q_i^r = 22,06 \text{ МДж/кг}$ в энергетическом котле ТП-87 массовая эмиссия БП составила $(0,6 - 1,2) \cdot 10^{-3}$ т/год. В условиях использования антрацита (Донецкий АШ) с теплотехническими характеристиками в энергетическом котле ТПП-210 $A^H = 1,91(\% \cdot \text{кг})/\text{МДж}$, $W^H = 0,47(\% \cdot \text{кг})/\text{МДж}$, $N^P = 0,5\%$, $V^{daf} = 4\%$, $Q_i^r = 18,23 \text{ МДж/кг}$ массовая эмиссия БП составила $(1,4 - 3,3) \cdot 10^{-3}$ т/год. Следует отметить, что полученные результаты расчетной оценки $C_{\text{бп}}$ в дымовых газах могут быть использованы энергетическими предприятиями на этапе сбора и подготовки экологической информации для обоснования установления технологических показателей выбросов ПАУ в атмосферный воздух.

Выводы

Детальный анализ обобщенных данных о наличии канцерогенных ПАУ в продуктах сгорания при сжигании органического топлива показал прямую корреляционную зависимость между концентрациями БП и СО в дымовых газах котлов. Отмечено, что на интенсивность образования БП значительное влияние оказывает реализация первичных (воздухоохранных) мероприятий, при этом массовые выбросы БП в атмосферный воздух могут превышать исходные значения в 5 – 6 раз из-за увеличения химического недожога, контролируемого по значениям СО в продуктах сгорания котлов.

Разработаны аналитические зависимости для расчетной оценки выбросов БП в атмосферный воздух при сжигании каменного угля (Кузнецкий Т) и антрацита (Донецкий АШ) в энергетических котлах ТП-87 и ТПП-210, отличающиеся тем, что относительная погрешность определения содержания БП в продуктах сгорания с их применением не превышает 15 % по сравнению с нормативной методикой.

Определены массовые выбросы БП как наиболее яркого представителя ПАУ для различных вариантов сжигания топлива и паровой производительности котельных установок, учитывающих режимно-технологические условия топочного процесса и теплотехнические характеристики твердого топлива. Массовая эмиссия БП в диапазоне рассмотренных значений режимно-технологических параметров при сжигании каменного угля (Кузнецкий Т) в котле ТП-87 составила $(0,6 - 1,2) \cdot 10^{-3}$ т/год, в условиях применения антрацита (Донецкий АШ) в энергетическом котле ТПП-210 массовые выбросы БП равны $(1,4 - 3,3) \cdot 10^{-3}$ т/год.

Полученные результаты могут быть применены на теплоэнергетических объектах на стадии подготовки экологической информации для обоснования значений технологических показателей, а также при разработке программы повышения экологической эффективности энергетических предприятий. Таким образом, выполненные оценки концентраций БП в дымовых газах котельных установок, сжигающих каменный уголь (Кузнецкий Т) и антрацит (Донецкий АШ), рекомендуется применять на стадии сбора исходной информации при установлении годовых валовых выбросов и инвентаризации выбросов высокотоксичных веществ на тепловых электрических станциях.

Литература

1. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Альмгрен А.Р и др. Технические и экономические проблемы и риски внедрения наилучших доступных технологий на российских ТЭС // Новое в российской электроэнергетике. 2021. № 1. С. 15-20.
2. Росляков П.В., Черкасский Е.В., Гусева Т.В. и др. Технологическое нормирование объектов теплоэлектроэнергетики: наилучшие доступные технологии и нормы общего действия // Теплоэнергетика. 2021. № 10. С. 1-13.
3. Власенко С.А., Росляков П.В., Сердюков В.А. Методические подходы к определению технологических показателей наилучших доступных технологий при актуализации информационно-технического справочника ИТС 38-2017 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» // Инновации. Наука. Образование. – 2022. № 55. С. 31-39.
4. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Дмитренко В.В., Рудомазин В.В. Особенности актуализированного информационно-технического справочника ИТС 38-2022 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» // Электрические станции. – 2022. № 12 (1097). С. 42-50.

5. Цирульников Л.М., Конюхов В.Г., Димант И.Н., и др. О содержании канцерогенных веществ в уходящих газах при сжигании газа и мазута // Теплоэнергетика. 1976. № 9. С. 32-35.
6. Соколова Я.И., Цирульников Л.М., Конюхов В.Г. О составе полициклических ароматических углеводородов в продуктах сгорания // Теплоэнергетика. 1983. № 4. С. 17-19.
7. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Ионкин И.Л., Егорова Л.Е. Обеспечение достоверного непрерывного инструментального контроля выбросов маркерных загрязняющих веществ ТЭС в атмосферу // Теплоэнергетика. 2022. № 1. С. 68 – 77.
8. Кондратьева О.Е., Росляков П.В., Недре А.Ю и др. Внедрение систем непрерывного контроля выбросов как часть цифровой трансформации энергетических предприятий // Энергетик. 2020. № 10. С. 3-5.
9. Росляков П.В., Закиров И.А., Ионкин И.Л., и др. Исследование процессов конверсии оксида углерода и бенз(а)пирена вдоль газового тракта котельных установок // Теплоэнергетика. 2005. № 4. С. 44-50.
10. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., и др. Очистка газовых выбросов котельных установок от твердых частиц // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. № 1. С. 3-9.
11. Huang Y., Wei J., Song J., et al. Determination of low levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil by high performance liquid chromatography with tandem fluorescence and diode array detectors // Chemosphere. 2013. V. 92. № 8. pp. 1010-1016.
12. Lara S., Villanueva F., Martín P., et al. Investigation of PAHs, nitrated PAHs and oxygenated PAHs in PM₁₀ urban aerosols. A comprehensive data analysis // Chemosphere. 2022. V. 294. pp. 133745.
13. Liljelind P., Soderstrom G., Hedman B., et al. Method for multiresidue determination of halogenated aromatics and PAHs in combustion-related samples // Environmental Science and Technology. 2003. V. 37. № 16. pp. 3680.
14. Song Y., Zhang Y., Chen W., et al. The cellular effects of PM_{2.5} collected in Chinese Taiyuan and Guangzhou and their associations with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), nitro-PAHs and hydroxy-PAHs // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2020. V. 191. pp. 110225.
15. Иваницкий М.С. Расчет выбросов бенз(а)пирена при сжигании органического топлива в энергетических котлах ТЭС и котельных // Энергобезопасность и энергосбережение. 2022. № 6. С. 11-14.

Автор публикации

Иваницкий Максим Сергеевич – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Энергетика» филиала «Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: mseiv@vandex.ru.

References

1. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Al'mgren AR, et al. Tekhnicheskie i ekonomicheskie problemy i riski vnedreniya nailuchshikh dostupnykh tekhnologii na rossiiskikh TES. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike*. 2021;1:15-20.
2. Roslyakov PV, Cherkasskii EV, Guseva TV, et al. Tekhnologicheskoe normirovanie ob"ektov teploelektroenergetiki: nailuchshie dostupnye tekhnologii i normy obshchego deistviy. *Teploenergetika*. 2021;10:-13.
3. Vlasenko SA, Roslyakov PV, Serdyukov VA. Metodicheskie podkhody k opredeleniyu tekhnologicheskikh pokazatelei nailuchshikh dostupnykh tekhnologii pri aktualizatsii informatsionno-tekhnicheskogo spravochnika ITS 38-2017 «Szhiganie topliva na krupnykh ustanovkakh v tselyakh proizvodstva energii. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*. 2022;55(31-39).
4. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Dmitrenko VV, et al. Osobennosti aktualizirovannogo informatsionno-tekhnicheskogo spravochnika ITS 38-2022 «Szhiganie topliva na krupnykh ustanovkakh v tselyakh proizvodstva energii». *Elektricheskie stantsii*. 2022;12 (1097):42 – 50.
5. Tsiul'nikov LM, Konyukhov VG, Dimant IN. O soderzhanii kantserogennykh veshchestv v ukhodyashchikh gazakh pri szhiganii gaza i mazuta. *Teploenergetika*. 1976;9:32-35.
6. Sokolova YaI, Tsiul'nikov LM, Konyukhov VG. O sostave politsiklicheskikh aromaticeskikh uglevodorodov v produktakh sgoraniya. *Teploenergetika*. 1983;4:17-19.

7. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Ionkin IL. Obespechenie dostovernogo nepreryvnogo instrumental'nogo kontrolya vybrosov markernykh zagryaznyayushchikh veshchestv TES v atmosferu. *Teploenergetika*. 2022;1:68 – 77.
8. Kondrat'eva OE, Roslyakov PV, Nedre AYU, et al. Vnedrenie sistem nepreryvnogo kontrolya vybrosov kak chast' tsifrovoi transformatsii energeticheskikh predpriyatii. *Energetik.* – 2020;10:3-5.
9. Roslyakov PV, Zakirov IA, Ionkin IL, et al. Issledovanie protsessov konversii oksida ugleroda i benz(a)pirena vdol' gazovogo trakta kotel'nykh ustanovok. *Teploenergetika*. 2005;4:44-50.
10. Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS, et al. Ochistka gazovykh vybrosov kotel'nykh ustanovok ot tverdykh chastits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2020;1:3-9.
11. Huang Y, Wei J, Song J, et al. Determination of low levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil by high performance liquid chromatography with tandem fluorescence and diode array detectors. *Chemosphere*. 2013;92(8):1010 – 1016.
12. Lara S, Villanueva F, Martín P. Investigation of PAHs, nitrated PAHs and oxygenated PAHs in PM₁₀ urban aerosols. A comprehensive data analysis. *Chemosphere*. 2022;294:133745.
13. Liljelind P, Soderstrom G, Hedman B, et al. Method for multiresidue determination of halogenated aromatics and PAHs in combustion-related samples. *Environmental Science and Technology*. 2003;37(16):3680.
14. Song Y, Zhang Y, Chen W. The cellular effects of PM_{2.5} collected in Chinese Taiyuan and Guangzhou and their associations with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), nitro-PAHs and hydroxy-PAHs. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020;191:110225.
15. Ivanitskii MS. Raschet vybrosov benz(a)pirena pri szhigani organicheskogo topliva v energeticheskikh kotlakh TES i kotel'nykh. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*. 2022;6:11-14.

Author of the publication

Maxim S. Ivanitskiy – Moscow Power Engineering Institute.

Шифр научной специальности:

2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки)

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

2.4.3. Электроэнергетика (технические науки);

2.4.10. Техносферная безопасность (в энергетике)

Получено

14.02.2023 г.

Отредактировано

01.03.2023г.

Принято

01.03.2023г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ НАДЁЖНОСТИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Крупенёв Д.С.^{1,2}, Пискунова В.М.¹, Гальфингер А.Г.¹

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

² Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

krupenev@isem.irk.ru, vitapiskunova98@gmail.com, galfinger98@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Поддержание требуемого уровня энергетической безопасности (ЭБ) и надёжности топливо- и энергоснабжения является одной из приоритетных задач при управлении топливно-энергетическим комплексом (ТЭК). При функционировании ТЭК возможна реализация различных угроз, которые могут приводить к нарушению надёжности топливоснабжения и энергоснабжения и появлению дефицита различных видов энергоресурсов. Для оценки уровня энергетической безопасности рассматриваются подходы формированию математической модели ТЭК, объединяющей все отрасли энергетики. Несмотря на сопряжённые с энергетической трансформацией тенденции перехода на низкоуглеродные источники энергии, тепловые электростанции остаются одним из основных источников тепло- и электроэнергии. Из-за способности вырабатывать большие объёмы тепловой энергии только ТЭС способны быть источником централизованного энергоснабжения крупных территорий. В связи с этим при моделировании ТЭК необходимо разработать математические модели ТЭС, которые будут корректно отражать технологические процессы, влияющие на надёжность энергоснабжения. *ЦЕЛЬ.* Разработка математических моделей тепловых электростанций с учётом взаимодействия электроэнергетической, теплоснабжающей и топливной систем в рамках работы топливно-энергетического комплекса для исследования энергетической безопасности и надёжности топливоснабжения и энергоснабжения. *МЕТОДЫ.* В качестве методов используется математическое моделирование зависимостей расхода топлива от электрической и тепловой нагрузки на тепловых электростанциях. Для получения аналитических зависимостей была проведена аппроксимация расходных характеристик тепловых электростанций методом наименьших квадратов. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В рамках работы были получены аналитические зависимости потребления топлива от тепловой и электрической нагрузки для различных видов тепловых агрегатов. Для всех рассмотренных паровых турбин были получены линейные зависимости количества теплоты, подводимого к турбине, от ее нагрузки (электрической и/или теплофикационной в зависимости от типа турбины). Для котлоагрегатов была проведена аппроксимация зависимости КПД от тепловой нагрузки. По результатам аппроксимации принята линейная зависимость. Для газотурбинных установок проведена аппроксимация зависимости КПД от нагрузки, по результатам которой получен полином второго порядка. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* В работе исследовалась задача математического моделирования взаимосвязанной работы топливной, теплоэнергетической и электроэнергетической систем в рамках функционирования ТЭК. Получены аналитические зависимости для разных типов генерирующего оборудования, включающего в себя котлоагрегаты, паровые турбины и газотурбинные установки. Полученные зависимости необходимы для анализа энергетической безопасности и надёжности топливоснабжения и энергоснабжения. Модели тепловых электростанций, представленные в работе, являются наиболее пригодными для анализа энергетической безопасности и надёжности топливоснабжения и энергоснабжения, так как они дают необходимую точность расчетов и учитывают специфику различного генерирующего оборудования, не опускаясь при этом на уровень микропараметров.

Ключевые слова: топливно-энергетический комплекс; теплоэлектростанция; моделирование; расходные характеристики; надёжность; энергетическая безопасность.

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ "FWEU-2021-0003") программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. с

Для цитирования: Крупенёв Д.С., Пискунова В.М., Гальфингер А.Г. Моделирование тепловых электростанций при исследовании надёжности энергоснабжения и энергетической безопасности // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 12-25. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-12-25.

MODELING OF THERMAL POWER PLANTS IN THE STUDY OF RELIABILITY OF POWER SUPPLY AND ENERGY SECURITY

DS. Krupenev^{1,2}, VM. Piskunova¹, AG. Galfinger¹

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

² Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

krupenev@isem.irk.ru, vitapiskunova98@gmail.com, galfinger98@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Maintaining the required level of energy security (ES) and reliability of fuel and energy supply is one of the priority tasks in the management of the energy sector. In the functioning of the fuel and energy complex various threats are possible, which can lead to the violation of the reliability of fuel and energy supply and the emergence of shortages of various types of energy resources. To assess the level of energy security, approaches are considered to form a mathematical model of the FEC, which combines all sectors of the energy sector. Despite the trends of transition to low-carbon energy sources associated with energy transformation, thermal power plants remain one of the main sources of heat and electricity. Due to the ability to generate large amounts of heat only thermal power plants can be a source of centralized energy supply of large territories. In this regard, when modeling the fuel and energy complex, it is necessary to develop mathematical models of TPPs, which will correctly reflect the technological processes that affect the reliability of energy supply. *OBJECT.* Development of mathematical models of interaction of electric power, heat supply and fuel systems within the framework of thermal power plants designed to study energy security and reliability of fuel and energy supply. *METHODS.* Mathematical modeling of fuel consumption dependences on electrical and thermal load at thermal power plants is used as methods. To obtain analytical dependencies, the least squares approximation of the consumption characteristics of thermal power plants was carried out. *RESULTS.* As part of the work, analytical dependences of fuel consumption on thermal and electrical load for various types of thermal units were obtained. For all considered steam turbines, linear dependences of the amount of heat supplied to the turbine on its load (electrical and/or heating depending on the type of turbine) were obtained. For boilers, an approximation of the dependence of efficiency on thermal load was carried out. According to the results of the approximation, a linear dependence is assumed. For gas turbine installations, an approximation of the dependence of the efficiency on the load was carried out, according to the results of which a second-order polynomial was obtained. *CONCLUSION.* The paper investigates the problem of mathematical modeling of the interconnected operation of fuel, heat and power and electric power systems within the framework of the functioning of the energy sector. Analytical dependences are obtained for different types of generating equipment, including boilers, steam turbines and gas turbine installations. The obtained dependences are necessary for the analysis of energy security and reliability of fuel and energy supply. The models of thermal power plants presented in the paper are the most suitable for the analysis of energy security and reliability of fuel and power supply, as they provide the necessary accuracy of calculations and take into account the specifics of various generating equipment, without dropping to the level of microparameters.

Keywords: fuel and energy complex; thermal power plant; modeling; flow characteristic; reliability; energy security.

Acknowledgments: The research was carried out under State Assignment Project (no. "FWEU-2021-0003") of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 using the

For citation: Krupenev DS, Piskunova VM, Galfinger AG. Modeling of thermal power plants in the study of reliability of power supply and energy security. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25(2):12-25. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-12-25.

Введение (Introduction)

Согласно Доктрине энергетической безопасности Российской Федерации, целью обеспечения ЭБ является поддержание защищённости экономики и населения страны от различных угроз. Реализация потенциальных угроз, в конечном счете, может приводить к нарушению надёжности топливоснабжения и энергоснабжения и появлению дефицита различных видов энергоресурсов. Для анализа подобных ситуаций существует ряд методов оценки уровня ЭБ [1, 2]. На основании этих методов, возможно, проводить качественный и количественный мониторинг показателей ЭБ и своевременно принимать рациональные решения по обеспечению требуемого уровня ЭБ.

Методы оценки уровня ЭБ можно условно разделить на две группы: индикативный метод и метод моделирования взаимосвязанной работы энергетических систем в рамках функционирования ТЭК. В данном исследовании рассматривается моделирование работы ТЭК. При этом формируется математическая модель, объединяющая такие условно независимые отрасли, как электроэнергетическая, теплоэнергетическая, угольная, нефтеснабжающая и газоснабжающая. В современных условиях развития ТЭК количество моделируемых систем может быть расширено добавлением водохозяйственной, водородоснабжающей и в некоторых случаях хладоснабжающей систем [3, 4].

Несмотря на сопряжённые с энергетической трансформацией тенденции перехода на низкоуглеродные источники энергии [5, 6], тепловые электростанции остаются одним из основных источников тепло- и электроэнергии. В России доля ТЭС в балансе генерации электроэнергии составляет более 60 %. Из-за способности вырабатывать большие объёмы тепловой энергии только ТЭС способны быть источником централизованного энергоснабжения крупных территорий. Актуальность их использования обуславливается возможностью встроиться в энергетический переход, как пример, интеграция технологий улавливания и хранения парниковых газов, внедрение замкнутых циклов с использованием парниковых газов в качестве теплоносителя (цикл Аллама), переход на газ и другие технологии, снижающие углеродный след.

В связи с этим при моделировании ТЭК необходимо разработать математические модели ТЭС, которые будут корректно отражать технологические процессы, влияющие на надёжность энергоснабжения. Целью этого исследования является разработка математических моделей взаимодействия электроэнергетической, теплоснабжающей и топливной систем в рамках работы ТЭС. Разработанные модели будут использоваться в модели ТЭК, предназначенной для исследования энергетической безопасности и надёжности энергоснабжения.

Литературный обзор (Literature Review)

Интерес для проводимого исследования в первую очередь представляет обзор и анализ математических моделей ТЭС, применяемых в математических моделях ТЭК. Целью таких математических моделей является определение дефицита и недоотпуска энергоресурсов. Также целесообразно рассмотреть математические модели, применяемые для оптимизации других параметров функционирования энергосистем, например, различных затрат на производство энергии.

В ИСЭМ СО РАН на протяжении длительного периода ведутся исследования в области энергетической безопасности и разрабатываются специальные математические модели как систем энергетики, так и ТЭК в целом [7-10]. Первая версия математической модели ИСЭМ СО РАН для анализа энергоснабжения получила название «Надёжность ТЭК» [7]. В ней представлено четыре взаимосвязанных подмодели ТЭК: газоснабжение, углеснабжение, нефтепродуктоснабжение и электроэнергетика. В подмодели электроэнергетика все рассматриваемые электростанции делятся на три типа: ТЭС, гидроэлектростанции (ГЭС) и атомные электростанции (АЭС). В качестве энергоресурса представлена электроэнергия (МВт·ч), что не позволяет в полной мере учесть специфику системы и форму графика потребления мощности. Теплоэнергетика представлена блоком котельных. ТЭС, в зависимости от вида основного топлива, подразделяются на угольные, мазутные, газо-мазутные. Отдельно выделяются электростанции, работающие на местных

видах топлива (торф, сланец) и на вторичных энергоресурсах. В этой модели отсутствовало взаимодействие между тепло- и электроэнергетикой. Модель «Надежность ТЭК» была модифицирована в модель «Резерв» [8], а затем в «Резерв 2» [9]. При модификации была добавлена возможность учета запасов топлива и резервов мощности. В новой модели тепловые электростанции были разделены на КЭС и ТЭЦ, в результате чего появилась взаимосвязь между тепло- и электроэнергией, которая выражалась через граничные режимы работы ТЭЦ: теплофикационный и конденсационный. В следующей модификации модель была переименована в «Модель развития ТЭК» [10]. На сегодняшний день она является последней. Взаимодействие электроэнергетической и теплоэнергетической систем в ней представлено через коэффициент зависимости генерации электроэнергии от теплофикационной нагрузки, находящийся в пределах от 1 до 4. Коэффициент был определен на основании статистических данных выработки тепло- и электроэнергии за один репрезентативный год на различных ТЭЦ. Данный метод моделирования приблизительно отражает реальные процессы и не дает высокой точности расчетов.

В работах [11, 12] представлена многопараметрическая модель функционирования ТЭК при различных режимах работы, которая предназначена для анализа состояния ТЭК при крупномасштабных повреждениях. В модели учитывается возможность применения различных видов топлива на одной электростанции, однако отсутствует учет тепловой энергии и разделение ТЭС на КЭС и ТЭЦ, в связи, с чем проанализировать взаимодействие электрической и тепловой энергии не представляется возможным. Электрические станции в данной работе представляются в виде узла-преобразователя топлива в электроэнергию. Преобразование моделируются при помощи линейных уравнений, ограничения задаются в виде неравенств.

В рассмотренных выше работах представлены математические модели ТЭК, предназначенные для анализа надёжности топливо- и энергоснабжения. В этих работах представлены принципы учета функционирования ТЭС, которые дают грубые оценки из-за высокой степени агрегированности.

Для формирования более полной картины в области моделирования ТЭС при исследовании надёжности топливо- и энергоснабжения необходимо проанализировать работы, сосредоточенные на моделировании ТЭС без учета других элементов и систем ТЭК, а также работ, где учитываются сугубо экономические критерии. В большинстве подобных работ взаимодействие электроэнергетической, теплоснабжающей и топливной систем описывается двумя способами: формируя мульти-энергетическую систему (МЭС) или моделируя ТЭС отдельно.

Первый способ представлен в статьях [13-19]. Взаимодействие различных энергопотоков в МЭС описывается на основании концепции энергетического хаба. Хаб состоит из элементов - преобразователей, каждый из которых характеризуется величиной КПД. В проанализированных работах топливные системы МЭС в основном представлены газом, реже биотопливом. В качестве преобразователей топлива в электрическую и тепловую энергию чаще всего моделируются газовые бойлеры, газотурбинные установки (ГТУ) и котлы утилизаторы. Зависимости выработки электроэнергии от выработки тепловой энергии в рассмотренных работах не представлены. МЭС, как правило, представлены изолированными системами, например, МЭС зданий, предприятий, районов, поселков и т.п. Однако принцип моделирования, применяемый в рассмотренных работах, может быть перенесен и на крупные системы с определенными доработками и формированием новых критериев. Эти принципы будут заключаться в формировании зависимостей между генерацией тепловой и электрической энергии, а также в учете разнообразия топлива.

Второй способ описания взаимодействия электроэнергетической, теплоснабжающей и топливной систем представлен в статьях [20-30]. В работе [20] авторы представили математическую модель угольной ТЭЦ с резервуаром для хранения термоклина, бойлером и тепловым насосом, а также провели оптимизацию функционирования системы с каждой из вышеперечисленных технологий. В работах [21,22] авторы более подробно описали моделирование технологий разделения энергии и их влияние на модель ТЭЦ. Расход топлива на ТЭЦ представлен в виде функции от тепловой и электрической нагрузки, которая не может быть получена аналитически. В связи с этим авторы рассчитали допустимую область эксплуатации ТЭЦ с учетом ряда технологических и эксплуатационных ограничений, таких как минимальные и максимальные электрическая и тепловая мощность турбины, минимальная и максимальная нагрузка котлоагрегата и т.д. Далее авторы определяют расход топлива с

учетом допустимой области эксплуатации. Целевая функция модели – снижение расхода угля. Модель ТЭЦ, представленная в данном цикле работ, подходит для применения при моделировании ТЭК, так как она достаточно точно отражает технологический процесс на ТЭЦ, при этом не опускаясь до микропараметров. В работах [28-30] представлены подробные модели ТЭС. Подобное моделирование может применяться при исследовании ТЭС как самостоятельной структуры, но из-за учета большого количества микропараметров подобные модели трудноприменимы для исследований ТЭК.

Таким образом, анализ математических моделей ТЭС, используемых при моделировании ТЭК в задачах оценки надёжности топливо- и энергоснабжения показал, что чаще всего ТЭС представлены в упрощенном виде с грубыми допущениями, влияющими на результаты оценки. В то же время существует ряд подходов обособленного моделирования ТЭС, которые могут быть адаптированы для применения в моделировании ТЭК при исследовании энергетической безопасности и надёжности топливо- и энергоснабжения.

Материалы и методы (Materials and methods)

В работе рассматриваются вопросы математического моделирования ТЭС при исследовании энергетической безопасности и надёжности топливо- и энергоснабжения. ТЭС рассматривается как объект, включающий три условно независимые подсистемы ТЭК: топливную, электроэнергетическую и теплоснабжающую.

Для корректного моделирования взаимодействия топливного сегмента с электроэнергетической и теплоснабжающей системами необходимо учитывать реальные зависимости расхода топлива от генерации тепло- и электроэнергии на ТЭС. Это может быть сделано на основании трех подходов к моделированию ТЭС:

- первый подход предусматривает упрощенное моделирование на основании агрегации совокупности ТЭС, находящихся в одной энергозоне. Основной проблемой при этом является низкая точность результата. Этот подход наиболее применим для проведения исследований при долгосрочном планировании развития ТЭК. Положительной стороной подхода является относительная простота при реализации и интерпретации результатов [7-10];

- второй подход основан на применении типовых диаграмм режима для моделирования отдельных ТЭС. Этот подход дает более высокую точность по сравнению с предыдущим, не опускаясь до микропараметров агрегатов. В отдельных случаях при отсутствии аналитических зависимостей выработки электро- и теплоэнергии от потребления топлива, необходима трудозатратная начальная подготовка, заключающаяся в аппроксимации характеристик элементов электрических станций. В современных условиях развития информационных технологий и математического аппарата этот подход является наиболее приемлемым для решения задач исследования энергетической безопасности и надёжности топливо- и энергоснабжения;

- третий подход основан на моделировании ТЭС по точным параметрам работы их оборудования. Этот подход является наиболее точным и детальным, так как учитывает состояние энергоносителя на каждом этапе производства тепло- и электроэнергии. На практике при моделировании крупных энергосистем таким способом возникают серьёзные трудности, так как необходима детальная информация по каждому генерирующему объекту, которая часто недоступна даже для эксплуатационного персонала ТЭС [23-30].

Для отражения технического процесса производства электро- и теплоэнергии были выделены ключевые составляющие станций для различных видов ТЭС: конденсационных электростанций (КЭС), теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), ГТУ и парогазовых установок (ПГУ). Для получения аналитических зависимостей необходимых для математического моделирования ТЭС производилась аппроксимация графиков и диаграмм, представленных в типовых характеристиках и руководящих документах, при помощи метода наименьших квадратов. С целью получения оптимальных зависимостей сравнивались результаты четырёх способов аппроксимации: среднего значения, линеаризации, квадратичной и кубической регрессии.

Результаты (Results)

Аппроксимация зависимости выработки электроэнергии от расхода подводимого тепла для конденсационных турбин (К)

Основной особенностью турбин типа К является отсутствие отборов пара. Тепло, подводимое к турбине - Q_0 (Гкал/ч), расходуется только на генерацию электроэнергии N (МВт), после чего отработанный пар поступает в конденсатор. Для данного типа турбин проанализирован ряд типовых характеристик, соответствующих турбоагрегатам с

различными номинальными мощностями. Зависимость генерации электроэнергии от количества подводимого тепла линейна (1), а коэффициенты a и b различны для турбин разных номинальных мощностей. Эти коэффициенты представлены в таблице 1.

$$Q_0 = a \cdot N + b \quad (1)$$

Таблица 1

Table 1

Коэффициенты, полученные при аппроксимации зависимости выработки электроэнергии от расхода тепла, для турбин типа К

Coefficients obtained by approximating the heat consumption dependency of electricity generation to type K turbines

Коэффициенты	Номинальная мощность турбины, МВт					
	50-60	100	160	200-220	300-330	500-550
a	2,289	2,126	2,033	1,952	1,951	1,933
b	3,4115	6,01	12,73	3,8	3,07	-7,4785

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Аппроксимация зависимости выработки электроэнергии и тепла от расхода подводимого тепла для теплофикационных турбин (Т)

Полная мощность, генерируемая турбиной типа Т, складывается из вынужденной и конденсационной составляющих. В теплофикационном режиме конденсационная мощность принимается минимально допустимой и равной 5,5% от номинальной. В теплофикационном режиме с независимой выработкой электроэнергии конденсационная мощность может повышаться за счет чего будет регулироваться генерация электроэнергии.

Из режимных диаграмм для турбин типа Т разной мощности были получены массивы точек, на основании которых, методом наименьших квадратов получены линейные зависимости следующего типа:

$$Q_0 = a \cdot N + b \cdot Q_m + c, \quad (2)$$

где Q_m (Гкал/ч) – теплофикационный отбор турбины.

Коэффициенты для турбин разных номинальных мощностей сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Table 2

Коэффициенты, полученные при аппроксимации зависимости выработки электроэнергии и тепла от расхода подводимого тепла, для турбин типа Т

Coefficients obtained by approximating the dependence of electricity and heat generation on the input heat consumption for T-type turbines

Коэффициенты	Номинальная мощность турбины, МВт		
	50-60	100-120	175-210
a	1,962	1,959	1,761
b	-0,707	-0,731	-0,691
c	22,831	38,886	71,747

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Аппроксимация зависимости выработки электроэнергии, тепла и отборов пара от расхода подводимого тепла для теплофикационных турбин с промышленным отбором пара (ПТ)

Турбины типа ПТ представляют наибольшую сложность для математического моделирования в связи с тем, что Q_0 для данного типа турбин зависит от трех величин: генерации электроэнергии, теплофикационного и промышленного отборов пара. Кроме того, для этих турбин типовые характеристики не унифицированы: тепловые отборы в разных документах представлены либо в виде количества пара D (т/ч), либо в виде количества теплоты Q (Гкал/ч). Для унификации модели потребовался перевод количества пара в количества теплоты (3-5) [31]:

$$Q_0 = (840,3 - i_{n,с}) \cdot D_0 \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

$$Q_n = (i_n - 100) \cdot D_n \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

$$Q_m = (i_m - 100) \cdot D_m \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где D_0 (т/ч) – количество пара, подводимое к турбине; D_m (т/ч) – количество пара в теплофикационном отборе турбины; D_n (т/ч) – количество пара в промышленном отборе турбины; Q_n (Гкал/ч) – промышленный отбор пара; $i_{n.e}$, i_n и i_m (кДж·моль⁻¹) – энтальпии питательной воды, промышленного и теплофикационного отборов соответственно. Они представляют собой полиномы второго порядка и определяются из графиков, представленных в РД рассматриваемых турбин.

Искомая зависимость для турбин типа ПТ определяется из диаграммы режимов, которая представляет собой нелинейную зависимость Q_0 от мощности турбины и отборов пара. В работе [4] для турбины ПТ-60-130/13 ЛМЗ была определена данная зависимость, средняя ошибка аппроксимации которой составляет менее 1%:

$$Q_0 = 0,000378 \cdot (N + m \cdot D_i)^2 + 0,275888 \cdot (N + m \cdot D_i) + 3,171708 + (1,1 + ((N + m \cdot D_i - 2) \cdot \beta)) \cdot \frac{D_p}{20}, \quad (6)$$

где β – поправочный коэффициент, определенный аналитически, m – безразмерная константа, учитывающая масштаб типовой диаграммы.

Сложности получения данной зависимости и ее уникальность (для турбин разных номинальных мощностей) привели к необходимости упрощения. Таким образом, было решено привести зависимость (6) к виду (7) методом, примененным для турбин типа Т.

$$Q_0 = a \cdot N + b \cdot Q_n + c \cdot Q_m + d, \quad (7)$$

Коэффициенты для разных номинальных мощностей представлены в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Коэффициенты, полученные при аппроксимации зависимости выработки электроэнергии, теплофикационного и промышленного отборов пара от расхода тепла, для турбин типа ПТ
Coefficients obtained by approximating the dependence of electricity generation, heating and industrial extraction of steam on heat consumption for PT-type turbines

Коэффициенты	Номинальная мощность турбины, МВт		
	60	80	135
a	1,673	1,842	1,329
b	0,608	0,709	0,567
c	0,264	0,389	0,309
d	21,972	19,316	84,782

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Аппроксимация зависимости выработки электроэнергии, тепла и отборов пара от расхода подводимого тепла для турбин с противодавлением (Р)

Для турбин типа Р характерен только один режим работы – теплофикационный. Турбины типа Р могут быть описаны двумя обобщающими уравнениями. Уравнение (8) описывает зависимость между вынужденной генерацией электроэнергии N_{mf} (МВт) от количества отбираемого пара Q_n (Гкал/ч).

$$N_{mf} = 0,3081 \cdot Q_n - 18,3913, \quad (8)$$

Для унификации всех единиц измерения промышленный отбор пара выражается через количество тепла. Количество подведенной к турбине теплоты определяется по формуле (9).

$$Q_0 = 0,2696 \cdot Q_n - 14,8424. \quad (9)$$

Коэффициенты уравнений (8) и (9) получены из типовых диаграмм режимов, представленных в руководящих документах.

Аппроксимация зависимости выработки тепла от расхода топлива для котлоагрегатов

На ТЭС с паровыми турбинами преобразование в тепловую энергию первичного энергоносителя – топлива – происходит в котлоагрегатах, в связи с чем необходимо получить зависимости расхода топлива в котле от тепловой нагрузки. Одна из основных характеристик котлоагрегата – это его КПД, который определяется как отношение

полезной теплоты, переданной теплоносителю, к теплоте, полученной при сгорании топлива. При различных режимах работы котлов КПД принимает разные значения, таким образом, существует нелинейная зависимость КПД от нагрузки. Нелинейность связана с тем, что при работе котлоагрегата возникают различные тепловые потери. При низкой загрузке котла (рис.1, точка А) основную роль играют потери тепловой энергии в окружающую среду. При увеличении вырабатываемой тепловой энергии данные потери снижаются, но при этом увеличиваются потери теплоты с уходящими газами, а также потери от химической и механической неполноты сгорания топлива. При оптимальной загрузке котлоагрегата (рис.1, точка Б) наблюдаются наименьшие суммарные тепловые потери. После прохождения данной точки второй тип потерь начинает возрастать в ускоренном темпе, в связи с чем наблюдается снижение КПД (рис. 1, точка В) [32].

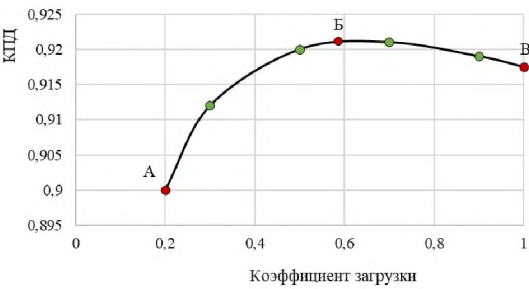


Рис. 1. Зависимость КПД котла от коэффициента загрузки
Fig. 1. Dependence of boiler efficiency on load factor
Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

На рисунке 1 представлена усредненная зависимость КПД котлов различной мощности от коэффициента загрузки. Для учета зависимости КПД котла от нагрузки была произведена аппроксимация типового графика зависимости КПД котла от коэффициента загрузки. Результаты аппроксимации приведены на рисунке 2 и сведены в таблицу 4.

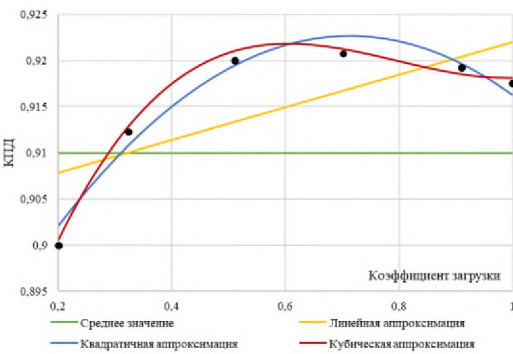


Рис.2. Результаты аппроксимации КПД от коэффициента загрузки
Fig. 2. Results of approximation of the efficiency from the load factor
Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Таблица 4
Table 4

Результаты аппроксимации зависимости КПД котлоагрегата от коэффициента загрузки
Results of approximation of the dependence of the boiler efficiency on the load factor

Метод	Зависимость	Коэффициент корреляции	Коэффициент детерминации	Средняя ошибка аппроксимации, %
Среднее значение	$\eta_k = 0,91$	-	-	1.0989
Линеаризация	$\eta_k = 0,01769 \cdot \beta + 0,9043$	0,71633	0,51313	0,49492
Кавдратичная регрессия	$\eta_k = -0,07796 \cdot \beta^2 + 0,11124 \cdot \beta + 0,88299$	0,97204	0,94486	0,17342
Кубическая регрессия	$\eta_k = 0,1319 \cdot \beta^3 - 0,3155 \cdot \beta^2 + 0,23659 \cdot \beta + 0,86478$	0,99613	0,99228	0,06152

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Как видно из таблицы 4 средняя ошибка аппроксимации при линеаризации не превышает 0,5 %. Поэтому имеются все основания использовать именно этот вид аппроксимации.

Для определения потребления топлива B котлоагрегата используется следующая зависимость [32]:

$$B = \frac{Q_0}{\eta_k \cdot Q_m}, \quad (10)$$

где Q_0 (Гкал/ч) – теплотворная способность топлива. η_k - КПД котла.

Аппроксимация зависимости выработки электроэнергии и тепла от расхода топлива для газотурбинных и парогазовых установок

Газотурбинные установки могут работать как отдельно, так и вместе с паровыми турбинами, образуя ПГУ. В качестве источника данных для модели были выбраны ГТУ компании Capstone. Для одиночного использования ГТУ характерен низкий КПД цикла выработки электроэнергии (до 35%), при применении паровых турбин КПД возрастает до 65% (с учетом наличия теплофикационных отборов).

ГТУ

Для аппроксимации зависимости электрического КПД от коэффициента загрузки ГТУ (Рис. 3) также используем метод наименьших квадратов:

$$\eta_{ГТУ} = -0,16071 \cdot \beta^3 + 0,45929 \cdot \beta + 0,02429. \quad (11)$$

Зависимость потребления топлива от генерации электроэнергии на ГТУ будет иметь следующий вид [33]:

$$B = \frac{N_{ГТУ}}{\eta_{ГТУ} \cdot Q_{газа}}, \quad (12)$$

где $N_{ГТУ}$ – электрическая мощность газовой турбины (МВт); $\eta_{ГТУ}$ - электрический КПД газовой турбины (формула 11); $Q_{газа}$ (Гкал/кг) – теплотворная способность газа.

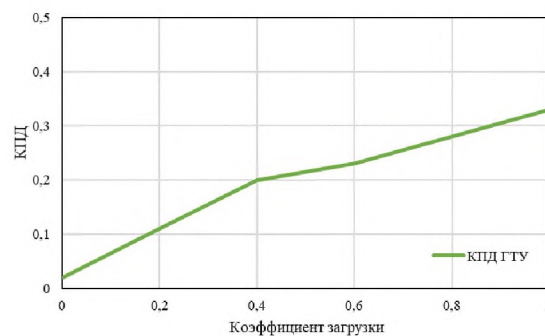


Рис. 3. Зависимость КПД основных типов ГТУ от коэффициента загрузки Fig. 3. Dependence of efficiency of main types of GTU on loading coefficient

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

ПГУ

Включение котла утилизатора и паровой турбины последовательно с газовой турбиной позволяет повысить КПД электростанции более чем в два раза. Электрическая энергия, генерируемая ПГУ, состоит из двух составляющих: газовой и паровой. В связи с этим математическое описание турбины выражается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} B = \frac{N_{ГТУ} + Q_0}{\eta_{ПГУ} \cdot Q_{газа}} \\ N_{ПГУ} = N_{ГТУ} + N \end{cases} \quad (13)$$

где N – электрическая мощность паровой турбины (МВт); $N_{ПГУ}$ - суммарная мощность ПГУ (МВт); Q_0 - количество тепла, переданного паровой турбине, определяется в

зависимости от типа паровой турбины по формулам (1), (7), (9); $\eta_{ПГУ}$ - КПД ПГУ, определяемый из рис. 4:

$$\eta_{ПГУ} = -0,08036 \cdot \beta^2 + 0,31893 \cdot \beta + 0,655. \quad (14)$$

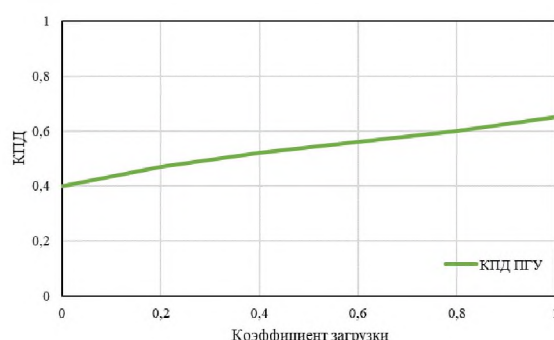


Рис. 4. Зависимость КПД ПГУ от коэффициента загрузки

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Обсуждение (Discussions)

Исследование проблем обеспечения надёжного топливоснабжения и энергоснабжения является неотъемлемой частью планирования развития энергосистем. Это прежде всего продиктовано высокой ценой отказа энергооборудования и появлением ущерба у потребителей из-за прерывания энергоснабжения. В статье рассмотрен вопрос математического моделирования ТЭС для дальнейшего использования разработанных моделей при моделировании топливно-энергетического комплекса. На основании проведенного анализа выявлено, что во многих рассмотренных исследованиях используются «грубые» математические модели ТЭС, которые могут приводить к искажению результатов. Существует ряд подробных моделей, которые из-за высокой детализации трудноприменимы при моделировании ТЭК. Также ряд работ направлен на решение частных экономических вопросов при управлении функционированием энергосистем.

В рамках представленной работы были получены аналитические зависимости потребления топлива от тепловой и электрической нагрузки для различных видов тепловых агрегатов ТЭС. Для паровых турбин были получены зависимости количества теплоты, подводимого к турбине, от ее нагрузки (электрической и/или тепловой в зависимости от типа турбины). Аппроксимация типовых диаграмм была проведена методом наименьших квадратов.

Для котлоагрегатов была проведена аппроксимация зависимости КПД от тепловой нагрузки четырьмя методами: усреднение, линеаризация, квадратичная и кубическая регрессия. По итогам аппроксимации определено, что все полученные зависимости (кроме среднего значения) имеют практически одинаковый коэффициент детерминации, в связи с чем для моделирования ТЭК целесообразно принять линейную зависимость.

Для ГТУ и ПГУ проводилась аппроксимация зависимости КПД от нагрузки. В результате были получены полиномы второго порядка.

Представленный способ описания тепловых электростанций является наиболее пригодным для анализа энергетической безопасности и надежности топливно- и энергоснабжения, так как он дает необходимую точность расчетов и учитывает специфику различного генерирующего оборудования, не опускаясь на уровень микропараметров.

Заключение (Conclusions)

В этой работе предложен подход к формированию математических моделей тепловых электростанций для описания взаимосвязи топливной, теплоэнергетической и электроэнергетической систем в рамках функционирования топливно-энергетического комплекса. Получены аналитические зависимости для разных типов генерирующего оборудования, включающего котлоагрегаты, паровые турбины и газотурбинные установки. Эти зависимости предназначены для интеграции в единую модель топливно-энергетического комплекса, используемую для анализа надежности энергоснабжения и энергетической безопасности.

Литература

1. Бушуев В. В., Воропай Н. И., Мастепанов А. М., и др. Энергетическая безопасность России. Новосибирск: Наука, 1998. 302 с.
2. Пяткова Н. И., Сендеров С. М., Чельцов М. Б., и др. Применение двухуровневой технологии исследований при решении проблем энергетической безопасности // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2000. № 6. С. 31-39.
3. Piskunova V.M. Methodological aspects of modeling the fuel and energy complex in the context of energy security // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 289.
4. Piskunova V.M., Krupenev D.S., Krupenev E.A., et al. Modelling the combined heat and power plants with steam turbines in the study of energy security problems // Environmental and Climate Technologies. 2021. Vol. 25, № 1. pp. 816–828.
5. Smil V. Energy Transitions: Global and National Perspectives, 2nd Edition; 2017.
6. Кулапин А.И. Энергетический переход: Россия в глобальной повестке // Энергетическая политика. 2021. №7(161). С. 10-15.
7. Зоркальцев В.И. Методы прогнозирования и анализа эффективности функционирования системы топливоснабжения. М.: Наука, 1988. 144с.
8. Надежность систем энергетики и их оборудования / под общей редакцией Ю. Н. Руденко. М.: Энергоатомиздат, 1994. 480 с.
9. Антонов Г.Н., Черкесов Г.П., Криворуцкий Л.Д. и др. Методы и модели исследования живучести систем энергетики. Новосибирск: Наука, 1990. 285 с.
10. Иерархическое моделирование систем энергетики / под. ред. Воропая Н.И., Стенникова В.А. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2020. 314 с. doi: 10.21782/B978-5-6043021-9-4
11. Козлов М.В., Малашенко Ю.Е., Назарова И.А. и др. Управление топливно-энергетической системой при крупномасштабных повреждениях. I. Сетевая модель и программная реализация // Известия РАН. ТиСУ. 2017. № 6. С. 50–73.
12. Малашенко Ю.Е., Назарова И.А. и др. Управление топливно-энергетической системой при крупномасштабных повреждениях. II. Постановки задач оптимизации // Известия РАН. ТиСУ. 2018. № 2. С. 39–51.
13. Yang S., Tan Z., Lin H., Li P., et al. A two-stage optimization model for Park Integrated Energy System operation and benefit allocation considering the effect of Time-Of-Use energy price // Energy. 2020. Vol. 195, №6.
14. Wu D., Han Z., Liu Z., et al. Comparative study of optimization method and optimal operation strategy for multiscenario integrated energy system // Energy. 2021. Vol. 217.
15. Luo F., Shaoa J., Jiaoa Z., et al. Research on optimal allocation strategy of multiple energy storage in regional integrated energy system based on operation benefit increment // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2021. Vol. 125, №3.
16. Li P., Wang Z., Yang W., et al. Hierarchically partitioned coordinated operation of distributed integrated energy system based on a master-slave game // Energy. 2021. Vol. 214, №2.
17. Qin C., Wang L., Han Z., et al. Weighted directed graph based matrix modeling of integrated energy systems // Energy. 2021. Vol. 214.
18. Герасимов Д.О., Суслов К.В., Уколова Е.В. Принципы построения модели энергетического хаба // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т.11. №3(43). С. 3–12.
19. Tukura N., O.Osigwe E. A model for booster station matching of gas turbine and gas compressor power under different ambient conditions // Heliyon. 2021. Vol. 7, №6.
20. Liu M., Wang S., Zhao Y., et al. Heat–power decoupling technologies for coal-fired CHP plants: Operation flexibility and thermodynamic performance // Energy. 2019. Vol. 188.
21. Lai F., Wang S., Liu M., et al. Operation optimization on the large-scale CHP station composed of multiple CHP units and a thermocline heat storage tank // Energy Conversion and Management. 2020. Vol. 211.
22. Liu M., Wang S., Yan J. Operation scheduling of a coal-fired CHP station integrated with power-to-heat devices with detail CHP unit models by particle swarm optimization algorithm // Energy. 2021. Vol. 214.
23. Qian Z., Agnew B. An assessment of Horlock’s approximate analysis of feed and district heating cycles for steam and CHP plant // Thermal Science and Engineering Progress. 2021. Vol. 22.
24. Santos M., André J., Mendes R., et al. Design and modelling of a small scale biomass-fueled CHP system based on Rankine technology // Energy Procedia. 2017. Vol. 129. pp. 676 – 683.

25. Wang Y., Wehrle L., Banerjee A., et al. Analysis of a biogas-fed SOFC CHP system based on multi-scale hierarchical modeling // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 163. pp. 78 – 87.
26. Horlock J.H. Approximate analyses of feed and district heating cycles for steam combined heat and power plant // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Power and Process Engineering*. 1987. Vol. 201, №3. pp. 193-200.
27. Новосёлов В.Б., Бродов Ю.М., Литвинов Е.В., и др. Повышение эффективности работы электростанций путём организации дополнительных отборов пара от паровых турбин // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2018. Т. 20. № 1-2. С. 90–99.
28. Клер А.М., Тюрина Э.А., Медников А.С. Математическое моделирование установок комбинированного производства жидких углеводородов и электроэнергии на основе угля // *Химия твердого топлива*. 2020. № 3. С. 14-26.
29. Клер А.М., Алексеюк В.Э. Эффективная методика настройки математических моделей теплоэнергетического оборудования на его фактическое состояние // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2019. №31. С. 136-158.
30. Клер А.М., Максимов А.С., Чалбышев А.В. и др. Оптимизация режимов работы ТЭЦ для максимизации прибыли в условиях балансирующего рынка электроэнергии // *Известия Российской Академии Наук. Энергетика*. 2014. № 2. С. 71-80.
31. Бененсон Е.И., Иоффе Л.С. Теплофикационные паровые турбины / под. ред. Бузина Д.П. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. 272с.
32. Александров В.Г. Паровые котлы средней и малой мощности. М. – Л.: Энергия, 1966г. 248с.
33. Ферзиллаев В.И., Гулик О.Н. Анализ методик моделирования режимов работы ГТУ. Методика Иванова Э.С. // *Инновации. Наука. Образование*. 2020. № 22. С. 241-251.

Авторы публикации

Крупенёв Дмитрий Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией «Надёжности топливо- и энергоснабжения» ИСЭМ СО РАН.

Пискунова Виктория Михайловна – аспирант института энергетики ИРНТУ, ассистент кафедры теплоэнергетики.

Гальфингер Артур Густавович – аспирант института энергетики ИРНТУ.

References

1. Bushuev VV, Voropai NI, Mastepanov AM, et al. *Energeticheskaya bezopasnost' Rossii*. Novosibirsk: Nauka; 1998.
2. Pyatkova NI, Senderov SM, Chel'tsov MB, et al. Primenenie dvukhurovnevoi tekhnologii issledovani pri reshenii problem energeticheskoi bezopasnosti. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika*. 2000; 6:31-39.
3. Piskunova VM. Methodological aspects of modeling the fuel and energy complex in the context of energy security. *E3S Web of Conferences*. 2021; 289. doi: 10.1051/e3sconf/202128901011.
4. Piskunova VM, Krupenev DS, Krupenev EA, et al. Modelling the combined heat and power plants with steam turbines in the study of energy security problems. *Environmental and Climate Technologies*. 2021; 25(1):816–828. doi: 10.2478/rtuct-2021-0061
5. Smil V. *Energy Transitions: Global and National Perspectives*, 2nd Edition; 2017.
6. Kulapin AI. Energeticheskii perekhod: Rossiya v global'noi povestke. *Energeticheskaya politika*. 2021; 7(161):10-15.
7. Zorkal'tsev VI. *Metody prognozirovaniya i analiza effektivnosti funktsionirovaniya sistem toplivosnabzheniya*. Moscow: Nauka; 1988.
8. Rudenko YuN., editors. *Nadezhnost' sistem energetiki i ikh oborudovaniya*. Moscow: Energoatomizdat, 1994.
9. Antonov GN, Cherkosov GP, Krivorutskii LD, et al. *Metody i modeli issledovaniya zhivuchesti sistem energetiki*. Novosibirsk: Nauka; 1990.
10. Voropai NI, Stennikov VA, editors. *Hierarchical modeling of energy systems*. NOVOSIBIRSK ACADEMIC PUBLISHING HOUSE «GEO»; 2020.

- 11.Kozlov MV, Malashenko YE, Nazarova IA, et al. Fuel and energy system control at large-scale damages. I. Network model and software implementation. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2017; 56(6):945-968.
- 12.Malashenko YuE, Nazarova IA, et al. Upravlenie toplivno-energeticheskoi sistemoi pri krupnomasshtabnykh povrezhdeniyakh. II. Postanovki zadach optimizatsii. *Izvestiya RAN. TiSU*. 2018; 2:39–51.
- 13.Yang S., Tan Z., Lin H., Li P., et al. A two-stage optimization model for Park Integrated Energy System operation and benefit allocation considering the effect of Time-Of-Use energy price. *Energy*. 2020; 195(6). doi: [10.1016/j.energy.2020.117013](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117013)
- 14.Wu D., Han Z., Liu Z., et al. Comparative study of optimization method and optimal operation strategy for multiscenario integrated energy system. *Energy*. 2021; 217. doi: [10.1016/j.energy.2020.119311](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119311)
- 15.Luo F., Shaoa J., Jiaoa Z., et al. Research on optimal allocation strategy of multiple energy storage in regional integrated energy system based on operation benefit increment. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021; 125(3). doi: [10.1016/j.ijepes.2020.106376](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106376)
- 16.Li P., Wang Z., Yang W., et al. Hierarchically partitioned coordinated operation of distributed integrated energy system based on a master-slave game. *Energy*. 2021; 214(2). doi: [10.1016/j.energy.2020.119006](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119006)
- 17.Qin C., Wang L., Han Z., et al. Weighted directed graph based matrix modeling of integrated energy systems. *Energy*. 2021; 214. doi: [10.1016/j.energy.2020.118886](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118886).
- 18.Gerasimov DO, Suslov KV, Ukolova EV. Principles of building a model energy cable. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2019; 43(3):3-12.
- 19.Tukura N, O.Osigwe E. A model for booster station matching of gas turbine and gas compressor power under different ambient conditions. *Heliyon*. 2021; 7(6). doi: [10.1016/j.heliyon.2021.e07222](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07222)
- 20.Liu M., Wang S., Zhao Y., et al. Heat–power decoupling technologies for coal-fired CHP plants: Operation flexibility and thermodynamic performance. *Energy*. 2019; 188. doi: [10.1016/j.energy.2019.116074](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116074)
- 21.Lai F., Wang S., Liu M., et al. Operation optimization on the large-scale CHP station composed of multiple CHP units and a thermocline heat storage tank. *Energy Conversion and Management*. 2020; 211. doi: [10.1016/j.enconman.2020.112767](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112767)
- 22.Liu M., Wang S., Yan J. Operation scheduling of a coal-fired CHP station integrated with power-to-heat devices with detail CHP unit models by particle swarm optimization algorithm. *Energy*. 2021; 214. doi: [10.1016/j.energy.2020.119022](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119022)
- 23.Qian Z., Agnew B. An assessment of Horlock’s approximate analysis of feed and district heating cycles for steam and CHP plant. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2021; 22. doi: [10.1016/j.tsep.2020.100746](https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100746)
- 24.Santos M., André J., Mendes R., et al. Design and modelling of a small scale biomass-fueled CHP system based on Rankine technology. *Energy Procedia*. 2017; 129:676 – 683. <https://doi.org/10.1016/j.egvpro.2017.09.143>
- 25.Wang Y., Wehrle L., Banerjee A., et al. Analysis of a biogas-fed SOFC CHP system based on multi-scale hierarchical modeling. *Renewable Energy*. 2021; 163:78 – 87. doi: [10.1016/j.renene.2020.08.091](https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.091)
- 26.Horlock J.H. Approximate analyses of feed and district heating cycles for steam combined heat and power plant. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Power and Process Engineering*. 1987; 201(3):193-200. doi: [10.1243/PIME_PROC_1987_201_024_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1987_201_024_02)
- 27.Novoselov VB, Brodov YM, Litvinov EV, et al. Increase efficiency of electric power stations by way of organization of additional choice of steam from steam turbines. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2018; 20(1-2):90-99.
- 28.Kler AM, Tyurina EA, Mednikov AS. Matematicheskoe modelirovanie ustanovok kombinirovannogo proizvodstva zhidkikh uglevodorodov i elektroenergii na osnove uglya. *Khimiya tverdogo topliva*. 2020; 3:14-26.
- 29.Kler AM, Alekseyuk VE. Effektivnaya metodika nastroiки matematicheskikh modelei teploenergeticheskogo oborudovaniya na ego fakticheskoe sostoyanie. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*. 2019; 31:136-158.
- 30.Kler AM, Maksimov AS, Chalbyshchev AV, et al. Optimizatsiya rezhimov raboty TETs dlya maksimizatsii pribyli v usloviyakh balansiruyushchego rynka elektroenergii. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Energetika*. 2014; 2:71-80.
- 31.Benenson EI, Ioffe LS, Buzina DP, editor. Teplofikatsionnye parovye turbiny. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Energoatomizdat, 1986.
- 32.Aleksandrov VG. Parovye kotly srednei i maloi moshchnosti. M. – L.: Energiya, 1966.

(In Russ).

33.Ferzillayev VI, Gulik ON. Analiz metodik modelirovaniya rezhimov raboty GTU. Metodika Ivanova E.S. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*. 2020; 22:241-251. (

Authors of the publication

Dmitry S. Krupenev - Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Victoria M. Piskunova - Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Artur G. Galfinger - Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Шифр научной специальности:

2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки)

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

2.4.3. Электроэнергетика

Получено

08.02.2023г.

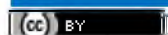
Отредактировано

22.02.2023г.

Принято

22.02.2023г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.313

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-2-26-39

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ МОЩНЫХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

Дадабаев Ш.Т.¹, Абдуллазянов Э.Ю.², Грачева Е.И.²

¹Худжандский политехнический институт Таджикского технического
университета имени академика М.С. Осими, г. Худжанд, Таджикистан

²Казанский государственный энергетический Университет, г. Казань, Россия
ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-2573-759X>, shahbozdadoboev@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. В настоящее время все большее применения получили безударные системы запуска высоковольтных электродвигателей. Эти системы ограничивают значения пусковых токов, а также устраняют знакопеременные колебания электромагнитного момента двигателей.

ЦЕЛЬ. Разработка мероприятий по повышению технического ресурса электрооборудования мощных оросительных насосных станций на основе применения систем плавного пуска для высоковольтных электродвигателей. **МЕТОДЫ.** В ходе исследования были использованы методы анализа технологических процессов насосных станций, методы математического и компьютерного моделирования систем электропривода. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработаны компьютерные модели для исследования режимных характеристик асинхронных и синхронных электроприводов насосных станций при прямом и плавном пуске электродвигателей. Предложена система безударного пуска высоковольтных электродвигателей оросительных насосных станций первого подъема на основе инвертора тока. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Надежность и долговечность работы электрооборудования зависит, в первую очередь, от технического ресурса, который определяется рядом факторов. Основными факторами, влияющими на технический ресурс электрооборудования крупных оросительных насосных станций, являются переходные режимы, возникающие при запуске насосных агрегатов. Предложенная в данной статье система плавного пуска высоковольтных электродвигателей оросительных насосных станций, позволяет устранить негативное воздействие переходных режимов на работу электрооборудования и, тем самым, повысить технический ресурс и надежность системы электроснабжения насосной станции в целом.

Ключевые слова: насосная станция; насосный агрегат; электропривод; асинхронный двигатель; синхронный двигатель; инвертор тока; технический ресурс.

Для цитирования: Дадабаев Ш.Т., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И. Мероприятия по повышению технического ресурса электрооборудования мощных оросительных насосных станций // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 26-39. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-26-39.

MEASURES TO INCREASE THE TECHNICAL RESOURCE OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF POWERFUL IRRIGATION PUMP STATIONS

ShT. Dadabaev¹, EYu. Abdullazyanov², EI. Gracheva²

¹Khujand Polytechnic Institute of the Tajik Technical University named after academician
M.S. Osimi, Khujand, Tajikistan

²Kazan State Power Engineering University, Russia

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-2573-759X>, shahbozdadoev@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* At present, unstressed systems for launching high-voltage electric motors have been increasingly used. These systems limit the values of starting currents as well as eliminate alternating oscillations of engine electromagnetic torque.

THE PURPOSE. Development of measures to improve the technical resource of electrical equipment of powerful irrigation pumping stations based on the use of soft start systems for high-voltage electric motors. *METHODS.* In the course of the study, methods for analyzing the technological processes of a pumping station, methods for mathematical and computer modeling of an electric drive were used. *RESULTS.* Computer models have been developed to study the regime characteristics of asynchronous and synchronous electric drives of pumping stations with direct and soft start of electric motors. A shockless start-up system for high-voltage electric motors of irrigation pumping stations of the first lift based on a current inverter is proposed. *CONCLUSION.* The reliability and durability of electrical equipment depends primarily on the technical resource, which is determined by a number of factors. The main factors influencing the technical life of the electrical equipment of large irrigation pumping stations are the transient modes that occur when the pumping units are started. The soft start system of high-voltage electric motors of irrigation pumping stations proposed in this article makes it possible to eliminate the negative impact of transient conditions on the operation of electrical equipment and, thereby, increase the technical resource and reliability of the power supply system of the pumping station as a whole.

Keywords: *pumping station; pumping unit; electric drive; asynchronous motor; synchronous motor; current inverter; technical resource.*

For citation: Dadabaev ShT, Abdullazyanov EYu, Gracheva EI. Measures to increase the technical resource of electrical equipment of powerful irrigation pump stations. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(2):26-39. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-26-39.

Введение (Introduction)

Оросительные насосные станции (ОНС), в основном, служат для орошения сельскохозяйственных земель и, как потребитель, электроэнергии они входят в первую категорию надежности электроснабжения. В больших ОНС установлены крупные вертикальные электродвигатели, которые выполняют основную технологическую задачу насосной станции. Вопросы, связанные проектированием, монтажом и эксплуатацией крупных вертикальных электродвигателей, рассмотрены в работе [1] Неймана З.Б. и других. В работе [2] Онищенко Г.Б. и Юнькова М.Г. рассмотрены особенности турбомеханизмов, определены требования к их электроприводу, обосновано целесообразности применения регулируемых электроприводов для мощных турбомеханизмов. В работе [3] Лезнова Б.С. рассмотрены режимы работы и способы регулирования насосных установок, а также особое внимание уделено системам управления электроприводами и энергосбережению насосных установок. По упомянутым работам известно, что синхронные двигатели (СД) имеют высокий коэффициент мощности и КПД, однако каждый запуск крупных СД приводят к скачкам токов и моментов двигателя, провалам напряжения в сети, нагревом обмоток двигателя и т.д. В результате возникают дополнительные потери, и уменьшается технический ресурс электрооборудования ОНС. В работах [4-5] Ларионова В.Н. и Калинина А.Г. рассмотрены вопросы энергоэффективности и энергосбережения в электроприводах с вентиляторной нагрузкой, а также исследовано взаимное влияние электропривода и электроснабжения насосных установок. Известно, что для каждого крупного электродвигателя по инструкции завода изготовителя, указывается допустимое число пусков в год, которого необходимо строго соблюдать. С другой стороны, часто в ОНС используют дискретный способ регулирования подачи насосов, что подразумевает частые включения и отключения насосных агрегатов. Таким образом, в работе ОНС возникают проблемы связанные принятием мер по повышению надежности и технического ресурса электрооборудования ОНС без ущерба на ее технологический процесс. Настоящее время для решения указанных проблем широко применяют частотно-регулируемые электроприводы. В работе [6] Поздеева А.Д., а также в работе [7] Ковача К.П. рассмотрены

переходные процессы в машинах переменного тока и электромагнитные процессы в частотно-регулируемых электроприводах переменного тока. Благодаря работам упомянутых исследователей сегодня мы имеем широкое представление об особенностях электротехнического комплекса ирригационных сооружений, о методах и способах регулирования насосных установок и их электроприводов, о конструкторских расчетах электрических машин, насосных установок и много других вопросов. Однако новые требования и задачи, связанные с энергосбережением, регулированием технологических процессов, повышением качества работы электрооборудования, автоматизацией производства и т.д. вынуждают исследователей проводить работы по разработке и внедрению новых средств, методов и способов решения поставленных задач.

Цель работы: разработка мероприятий по повышению технического ресурса электрооборудования мощных ОНС.

Объект исследования: асинхронные и синхронные электроприводы крупных ОНС.

Предмет исследования: технический ресурс электрооборудования мощных ОНС.

В современных условиях все большее применение получили безударные системы запуска высоковольтных электродвигателей. Эти системы ограничивают значения пусковых токов, а также устраняют знакопеременные колебания электромагнитного момента двигателей. Средствами безударного пуска крупных электродвигателей могут служить устройства плавного пуска (УПП) или преобразователи частоты (ПЧ). Сегодня рынок этих средств заполнен продуктами многочисленных компаний как отечественных, так и зарубежных фирм. В результате возникают новые проблемы, связанные с правильным и эффективным выбором оборудования для плавного пуска крупных электродвигателей. Поэтому необходимо детально исследовать технические возможности элементов и средств плавного пуска электродвигателей, эффективность и целесообразность внедрения этих систем на ОНС.

Научной и практической значимостью предлагаемой статьи является дополнение теоретической базы и обоснование практического использования системы плавного пуска электродвигателя, которая обеспечивает глубокое ограничение пусковых токов двигателя и повышает технический ресурс электрооборудования ОНС в целом.

Материалы и методы (Materials and methods)

В данной работе в качестве объекта исследования рассматривается ОНС Аштского района Республики Таджикистан. Указанный район является одним из крупных аграрных районов области и, соответственно, имеет крупные ОНС, где установлены более 60 насосных агрегатов (НА), и пять подъемов насосных станций (НС) [8-9]. Длина трубопроводов составляет более 33 км, а проектная площадь орошаемых земель более 12 тыс. гектаров. Аштский каскад насосных станций (АНС) начал перекачивать первые кубометры воды еще в 1979 году. Большую часть мощности в каскаде потребляет насосная станция первого подъема - АНС-1, где установлены четыре основных и два дренажных НА. В АНС-1 используются электродвигатели вертикального исполнения [10-11]. Основные насосы на станции представляют собой насосы центробежного типа марки 1200В-6,3/100-А следующими техническими параметрами: производительность насоса $Q = 22600 \text{ м}^3/\text{час}$, напор насоса $H = 88 \text{ м}$, КПД $\eta = 0,88$, скорость насоса $n_n = 375 \text{ об/мин}$, диаметр колес насоса $D = 2200 \text{ мм}$. Приводом насосов служат синхронные электродвигатели (СД) серии ВДС2-325/69-16 следующими техническими характеристиками: мощность двигателя $P_n = 8000 \text{ кВт}$, напряжение статора $U_n = 10 \text{ кВ}$, КПД $\eta = 0,9$ и частота вращения двигателя $n_n = 375 \text{ об/мин}$. Вспомогательные агрегаты оснащены насосами типа Д4000-95 и электродвигателями серии СДНЗ-15-49-6УЗ мощностью $P_n = 1600 \text{ кВт}$, напряжение статора $U_n = 10 \text{ кВ}$, частота вращения двигателя $n_n = 1000 \text{ об/мин}$. $Q-H$ характеристика насоса типа 1200В-6,3/100-А показана на рисунке 1.

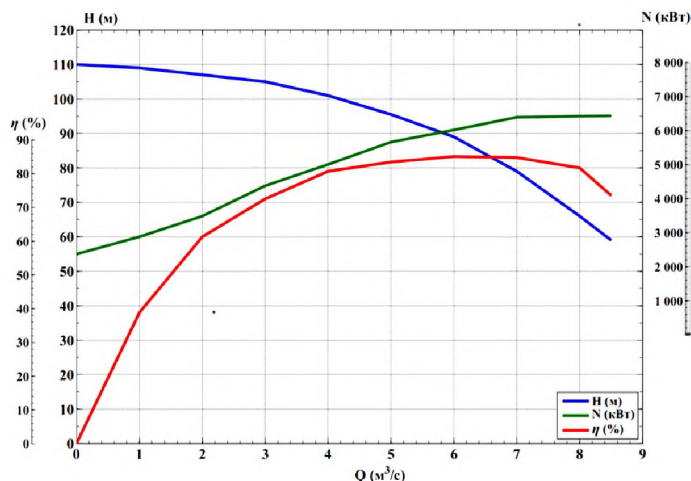


Рис. 1. Характеристика насоса 1200B-6,3/100-A (52B-11)

Fig. 1. Pump characteristic of 1200B-6,3/100-A (52B-11)

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В приведенной характеристике (рис. 1) напор насоса изображена, синем цветом, мощность потребляемая насосом показано с кривым зеленого цвета. Кривая с красным цветом изображена характеристика изменения КПД насоса. Таким образом, по характеристике насоса (рис. 1) можно оценить рабочий и регулировочный режим насоса.

Технологическая схема станции АНС-1 показано на рисунке 2.

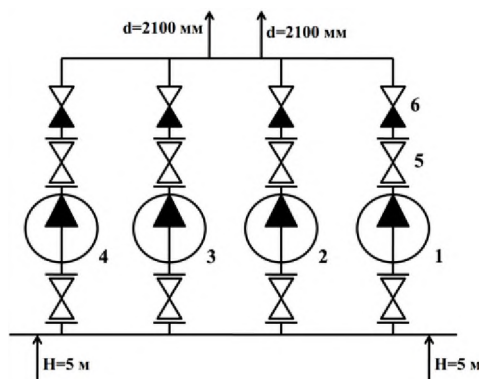


Рис. 2. Технологическая схема НС первого подъема АНС-1

Fig. 2. Technological scheme of the first lift pump station ANS-1

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В технологической схеме (рис. 2) приведены насосы 1-4, задвижка 5, и обратный клапан 6. В агрегатах АНС-1 установлены нерегулируемые электроприводы (ЭП), параметры которых невозможно регулировать без дополнительных устройств. Кроме этого, они имеют ряд недостатков в обеспечении технологических процессов НС, таких, как отсутствие возможности регулирования производительности НА и отсутствие возможности уменьшения негативных последствий пусковых переходных процессов. Пусковые переходные процессы в НА, в основном, обусловлены, тяжелыми режимами во время пуска мощных СД. Для устранения перечисленных проблем пуск высоковольтных СД осуществляется при пониженном напряжении, т.е. плавный пуск, при котором снижается пусковой ток [12-13]. Однако при снижении напряжения длительность пуска увеличивается, что может ухудшить условия синхронизации СД и, тем самым, привести к увеличению нагрева пусковой обмотки. Поэтому для каждого объекта электроснабжения, имеющего в своем составе мощные СД, необходимо провести общий анализ всех особенностей технического и технологического характера работы объекта для выявления оптимальных условий пуска двигателей. Например, при перегрузках электрооборудования электрической сети в процессе пуска мощных СД в ОНС могут возникнуть провалы напряжения в сети, что, свою очередь, будет негативно влиять на установленные агрегаты, взаимосвязанных НС [14-15]. В крупных ОНС первого подъема обычно применяются СД вертикального

исполнения с номинальной мощностью свыше 2 МВт и явнополюсной конструкцией ротора [16-18].

Как электрическая машина, СД является конструктивно достаточно сложным объектом при исследовании динамических режимов работы, так как физические модели требуют больших материальных затрат, а математические расчёты требуют существенных затрат времени и математических навыков исследователя [19-21]. Для решения указанных проблем в настоящее время многими исследователями широко используются прикладные программы компьютерного моделирования. Данный подход не требует финансовых затрат и времени для решения сложных математических задач. Одной из таких программ является MATLAB/Simulink, которая имеет в своем составе множество библиотек компонентов для моделирования энергетических и электротехнических объектов при исследовании переходных процессов динамических режимов работы [22-23]. Однако, при использовании программы MATLAB необходимо, в первую очередь, составить математическую модель исследуемого объекта. Затем преобразовать полученные уравнения и математические описания элементов системы к виду, удобному для применения компьютерной программы. В таких компьютерных программах используемые для моделирования технических систем структурные схемы, в основном, составляются при помощи математических выражений в операторном виде [24-25]. При исследовании сложных объектов и систем с помощью компьютерного моделирования вводится ряд допущений и упрощений для получения идеальных условий функционирования системы. Для упрощения математического описания явнополюсного СД используем модель двухфазного СД и модель СД в осях d, q (рис. 3 и 4).

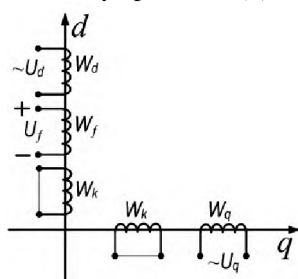


Рис. 3. Модель синхронного двигателя в осях d - q .

Fig. 3. Synchronous motor model in d - q axes

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В модели СД (рис. 3) приведены потокоцепления обмоток двигателя W_d, W_f, W_k, W_q по осям d и q . Кроме этого в данной модели приведены напряжения питания двигателя, для обмоток статора U_d, U_q , а для обмотки возбуждения двигателя U_f .

Система дифференциальных уравнений Парка - Горева для модели СД (рис. 3) будет иметь следующий вид

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{d\psi_d}{dt} + R_1 i_d - \omega \psi_q, \\
 -U_q &= \frac{d\psi_q}{dt} + R_1 i_q + \omega \psi_d, \\
 U_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + R_f i_f, \\
 0 &= \frac{d\psi_{kd}}{dt} + R_{kd} \cdot i_{kd}, \\
 0 &= \frac{d\psi_{kq}}{dt} + R_{kq} \cdot i_{kq}, \\
 M_{эм} &= p_n (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d), \\
 M_{эм} - M_c &= \frac{J}{P_n} \frac{d\omega}{dt}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

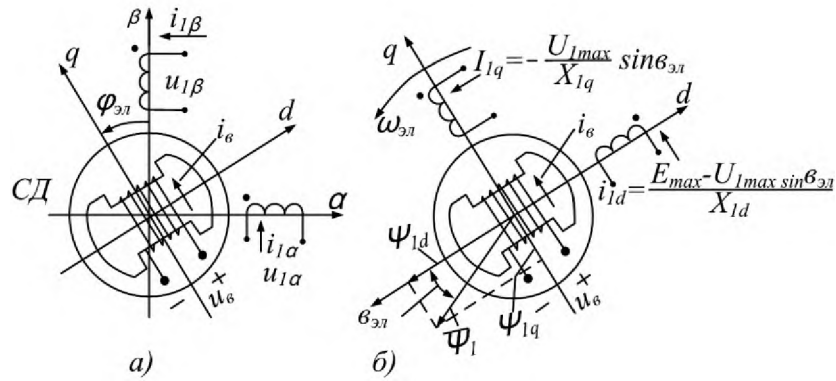


Рис. 4. Модель явнополусного СД: а) в осях α, β, d, q; б) в осях d, q

Fig. 4. Model of salient-pole SM: a) in axes α, β, d, q; b) in the axes d, q

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Напряжения, подводимые к зажимам обмоток статора СД описываются следующими выражениями

$$\begin{aligned} U_{1\alpha} &= U_{1\max} \sin \omega_{0\text{эл}} t, \\ U_{1\beta} &= U_{1\max} \cos \omega_{0\text{эл}} t. \end{aligned} \quad (2)$$

Для модели СД напряжения по осям определяются формулами прямого преобразования координат (рисунок 4).

$$\begin{aligned} U_d &= U_{1\max} \sin \theta, \\ U_q &= -U_{1\max} \cos \theta. \end{aligned} \quad (3)$$

Для модели СД (рисунок 4) потокосцепления СД можно описать уравнениями

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + L_{df} i_f + L_{dk} i_{kd}, \\ \psi_q &= L_q i_q + L_{qk} i_{kq}, \\ \psi_f &= L_f i_f + L_{df} i_d + L_{fk} i_{kd}, \\ \psi_{kd} &= L_{kd} i_{kd} + L_{dk} i_{dk} + L_{fk} i_f, \\ \psi_{kq} &= L_{kq} i_{kq} + L_{qk} i_{qk}. \end{aligned} \quad (4)$$

В системах уравнений (1) и (4) параметры обозначаются следующим образом: ψ – потокосцепление в СД; i – ток в обмотках СД; ω – угловая скорость СД; θ – угол между продольной осью ротора и осью поля статора СД. Индексы обозначают: d – продольная ось d ; q – поперечная ось q ; f – обмотка возбуждения СД; k – демпферная обмотка СД.

Системы дифференциальных уравнений (1) и (4) преобразуем в операторный вид

$$\begin{aligned} U_d &= \psi_d p - \psi_q \omega_{\text{эл}} + i_d R_1, \\ -U_q &= \psi_q p + \psi_d \omega_{\text{эл}} + i_q R_1, \\ U_f &= \psi_f + i_f R_f, \\ 0 &= \psi_{kd} p + i_{kd} R_{kd}, \\ 0 &= \psi_{kq} p + i_{kq} R_{kq}, \\ M &= p_n (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d), \\ M - M_c &= J p \omega. \end{aligned} \quad (5)$$

Система уравнений (5) является основой для компьютерного моделирования явнополусного СД при исследовании его переходных процессов.

Результаты и обсуждение

Объектом исследования является ОНС АНС-1, где установлены вертикальные СД мощностью 8 МВт, напряжение питания статора 10 кВ. Для компьютерного моделирования используем паспортные и расчетные данные СД марки ВДС2-325/69-16. Для моделирования прямого пуска СД используем программу MATLAB, результаты моделирования представлены в относительных единицах. На рисунке 5 приведена компьютерная модель для исследования характеристик переходных процессов СД насосов при прямом пуске. Как уже отмечали, прямой пуск СД в ОНС является самой распространенной способом запуска НА, однако вместо с тем, является и самым проблемным способом, протекающая сложными условиями.

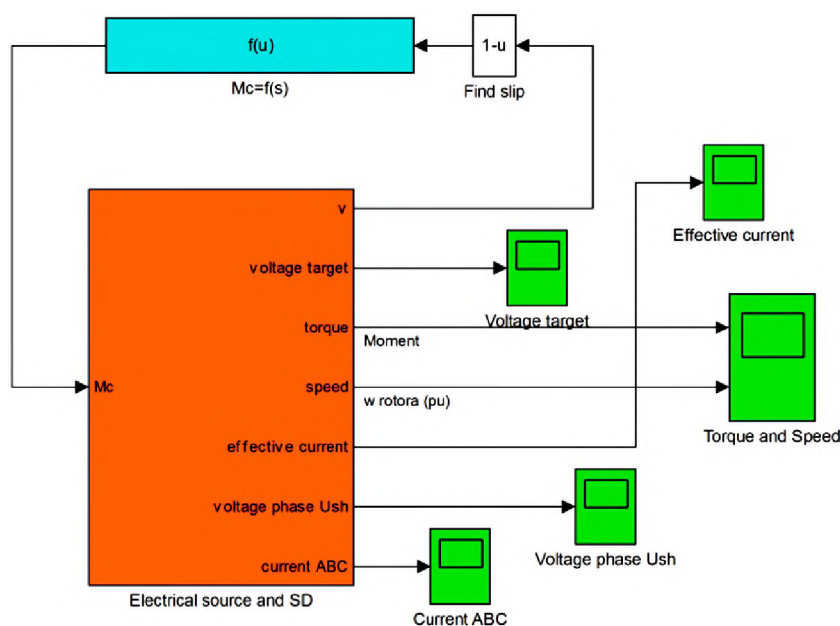


Рис. 5. Компьютерная модель для исследования переходных процессов СД насосного агрегата при прямом пуске

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Fig. 5. Computer model for the study of transient processes of the SM pumping unit during direct start

В модели (рисунок 5) блок $f(u)$ симулирует статическую нагрузку, которая приложена на вал электродвигателя. Блок *Electrical source and SD* симулирует источник электрической энергии и синхронный двигатель. Другие блоки в компьютерной модели служат для получения результатов моделирования в виде диаграмм.

Результаты компьютерного моделирования параметров ЭП показаны на рисунке 6 и рисунке 7.

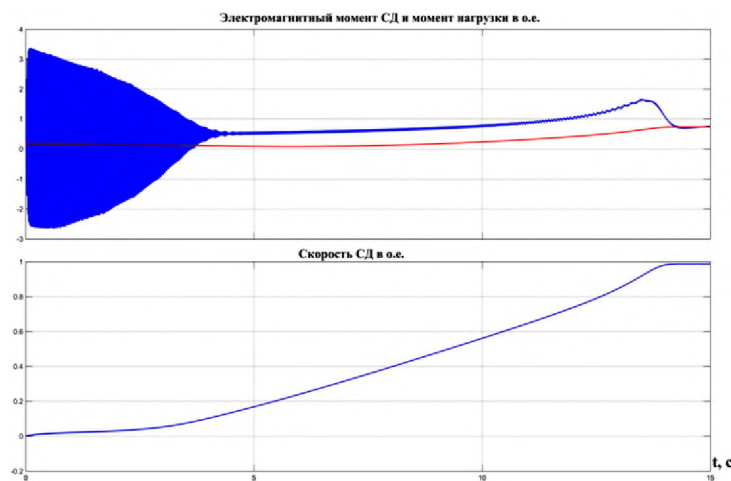


Рис. 6. Графики параметров переходных процессов при прямом пуске СД серии ВДС2-325/69-16

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Fig. 6. Graphs of parameters of transient processes during direct start of SM series VDS2-325/69-16

Графики рисунка 6 показывают, что электромагнитный момент СД при прямом пуске имеет знакопеременный характер, и продолжительность пуска составляет более 15 секунд, что соответствует паспортным данным СД данного типа и класса. Знакопеременный характер электромагнитного СД при прямом пуске приводит к вибрации и затягиванию разгона ротора двигателя, которого хорошо видно на рисунке 6 во втором окне диаграмм скорости СД.

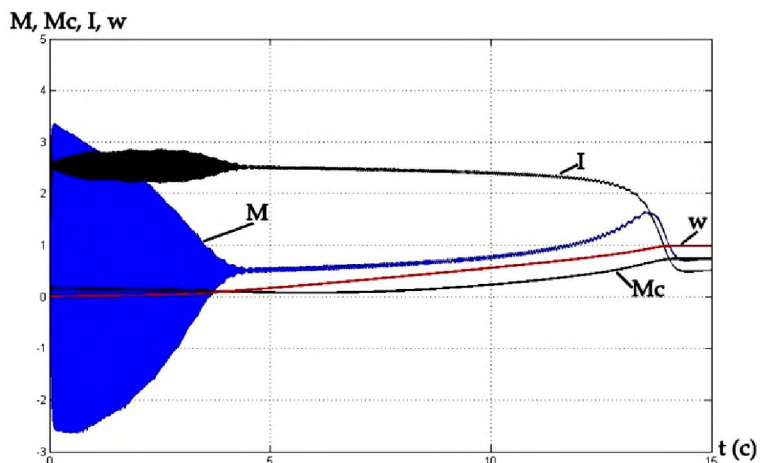


Рис. 7. Графики параметров переходных процессов действующего значения тока и момента при прямом пуске СД серии ВДС2-325/69-16

Fig. 7. Graphs of the parameters of transient processes of the effective value of current and torque during direct starting of the SM series VDS2-325 / 69-16

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Результаты моделирования (рисунки 6 и 7) показывают, что пусковой ток двигателя (кривая I) превышает номинальное значение более чем в 4 раза и составляет более 2.2 кА. Такое увеличение тока негативно влияет на все токопроводящие части электрооборудования НС. Кроме того, большие пусковые токи могут вызывать недопустимые провалы напряжения в сети и, тем самым, негативно влиять на установленные рядом с запускаемым СД агрегаты или электрооборудование НС в целом. Кривые M и Mc на рисунке 7 показывают изменения электромагнитного момента двигателя и момента сопротивления нагрузки. Кривая w показывает изменения скорости синхронного двигателя при прямом пуске.

С развитием силовой электроники стало возможным внедрение регулируемых ЭП в тех областях техники, где раньше требовались сверхсложные системы управления и значительные финансовые затраты. Внедрение современных систем в ЭП позволяет экономить электроэнергию и увеличивать технический ресурс электрооборудования. В настоящее время широкое применение получили ЭП с преобразователями частоты с элементами постоянного тока. В таких преобразователях на первом этапе переменный ток преобразуется в постоянный с помощью выпрямителя, а затем, на втором этапе, с помощью инвертора постоянный ток преобразуется в переменный. В большинстве случаев в таких преобразователях используют автономные инверторы напряжения, где регулируются напряжение и частота в сети. Однако установлено, что причиной негативных воздействий на электрооборудование являются большие значения токов при переходных процессах и при перегрузках. Поэтому задачи выбора систем плавного пуска для электродвигателей больших мощностей требует детальных исследований.

Перспективным способом плавного пуска высоковольтных ЭД является использование инверторов тока (ИТ) на базе тириستоров, где на выходе преобразователя формируется ток определенной формы, но форма напряжения будет, зависит только от нагрузки [8, 11]. Регулирование или ограничение тока при пусковых режимах ЭД является важной задачей, так как ток является одним из основных, воздействующих параметров на условия пуска. Поэтому необходимо детально исследовать данный способ плавного пуска, чтобы выявить его возможности и преимущества. Первым этапом при проведении исследований является применение метода компьютерного моделирования, при помощи которого можно получить графики переходных процессов основных параметров ЭП, таких, как токи статора, скорость и электромагнитный момент двигателя.

Для выполнения компьютерного моделирования пуска электродвигателей при наличии в ЭП ИТ используем программу *MATLAB* версии R2013a. В первом случае моделирование выполняется для асинхронного двигателя (АД) насосной установки мощностью 1600 кВт. Разработанная компьютерная модель для исследования пускового режима АД при наличии в системе ЭП ИТ приведена на рисунке 8.

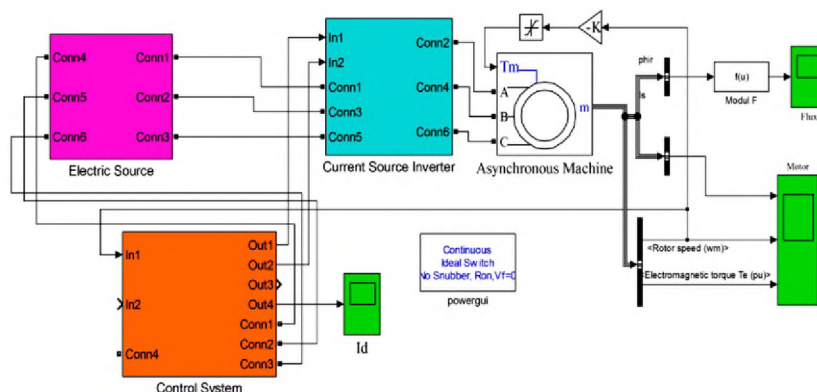


Рис. 8. Компьютерная модель для исследования пускового режима АД при наличии в схеме ЭП инвертора тока

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Fig. 8. Computer model for study of the starting mode of AM in the presence of CSI in the ED circuit

В модели (рис. 8) подсистемы *Electrical Source* и *Current Source Inverter* рассматриваются в качестве источника питания и ИТ, блок *Control System* является системой управления АД. Результаты моделирования показаны на рисунках 9 - 11.

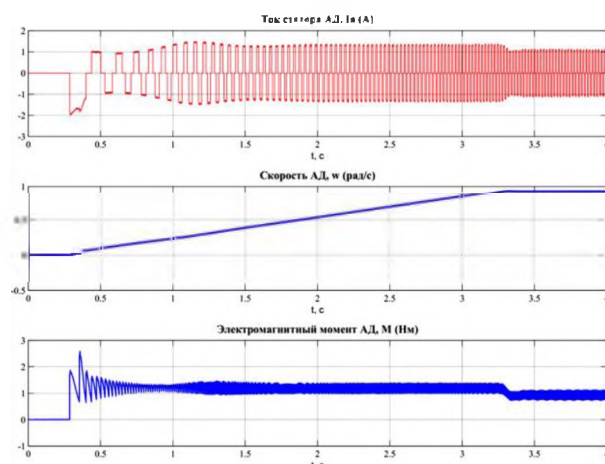


Рис. 9. Графики изменения параметров АД при пуске при наличии в схеме ЭП с ИТ

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Fig. 9. Graphs of changes in AM parameters at start-up in the presence of CSI in the ED circuit

Графики переходных процессов (рис. 9) АД при пуске с инвертором тока показывает, что пусковой ток практически устранен и составляет 1,33 кратное значение от номинального тока АД. Другой особенностью пуска АД с ИТ заключается в том, что полностью устранена знакопеременные колебания электромагнитного момента двигателя, что способствует уменьшения вибрации в машине и увеличению прочности ее механических частей.

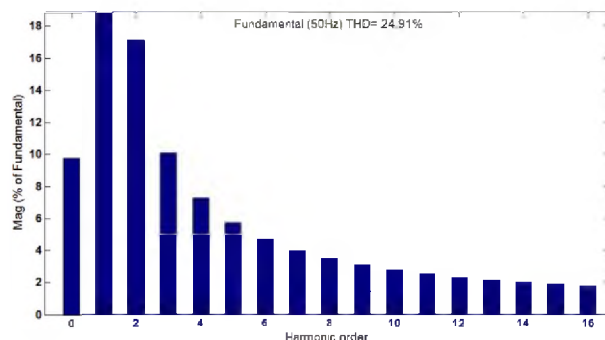


Рис. 10. Анализ гармонического состава тока фазы А при пуске с ИТ

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Fig. 10. Analysis of the harmonic content of phase A current at start with CSI

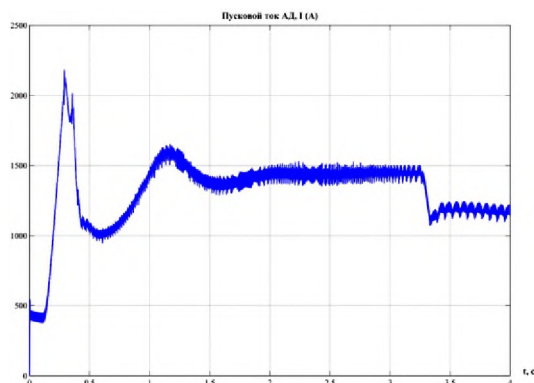


Рис. 11. Графики результирующего пускового тока переходного процесса АД для схемы ЭП с ИТ

Fig. 11. Graphs of the resulting starting current of the AM in transient process for the ED circuit with CSI

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Номинальный ток исследуемого АД составляет 1.2 кА и график рисунка 11 показывает, что максимальный кратковременный пусковой ток двигателя составляет примерно 2.2 кА, а текущие значения пускового тока не превышают 1.6 кА. Таким образом, максимальный кратковременный пусковой ток двигателя увеличился в 1.83 раза, а текущие пусковые токи в 1.33 раза относительно номинального значения тока. При этом, влияние ИТ на сеть питания соответствует требованиям стандартов и максимальное значение гармоник тока фазы А составляет 24.91% (рис. 10).

В мощных ОНС в качестве двигателей для НА обычно используют СД вертикального исполнения, где критериями для их выбора могут являться - вид пусковой характеристики, перегрузочная способность, электромагнитная совместимость и т.д. На рисунке 12 приведена компьютерная модель ЭП с СД, когда их пуск выполняется с помощью ИТ, результаты моделирования показаны на рисунках 13 и 14.

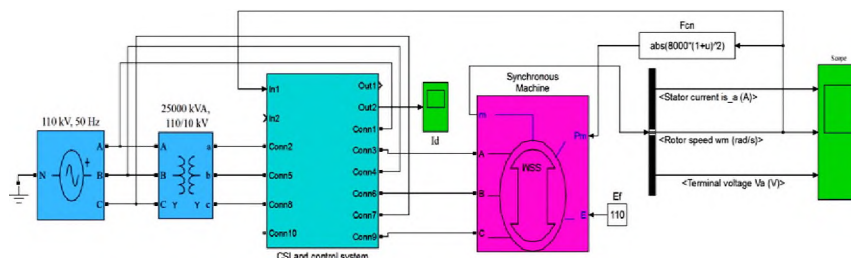


Рис. 12. Компьютерная модель электропривода с СД и ИТ

Fig. 12. Computer model of an electric drive with SM and CSI

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В модели (рис. 12) подсистема CSI and control system играют роль инвертора тока и системы управления. Кроме этого в модели имеется источник электроэнергии и трансформатор с мощностью 25 МВА, а также синхронный двигатель (блоком Synchronous Machine).

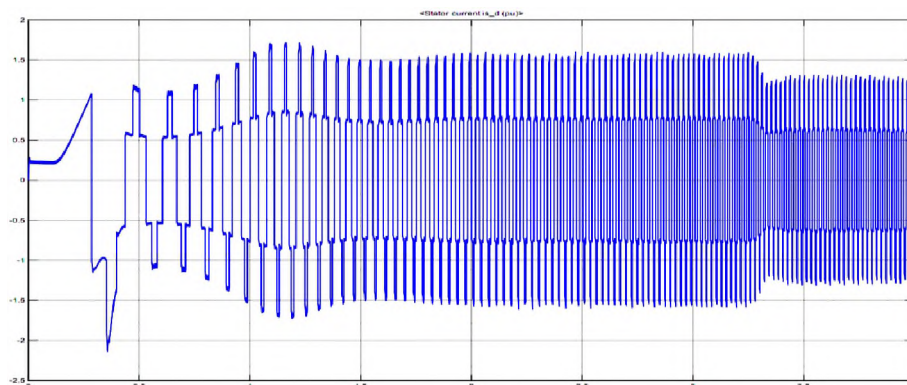


Рис. 13. Графики тока статора СД по оси d при пусковом режиме

Fig. 13. Graphs of the stator current of the SD along the d axis during the starting mode

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

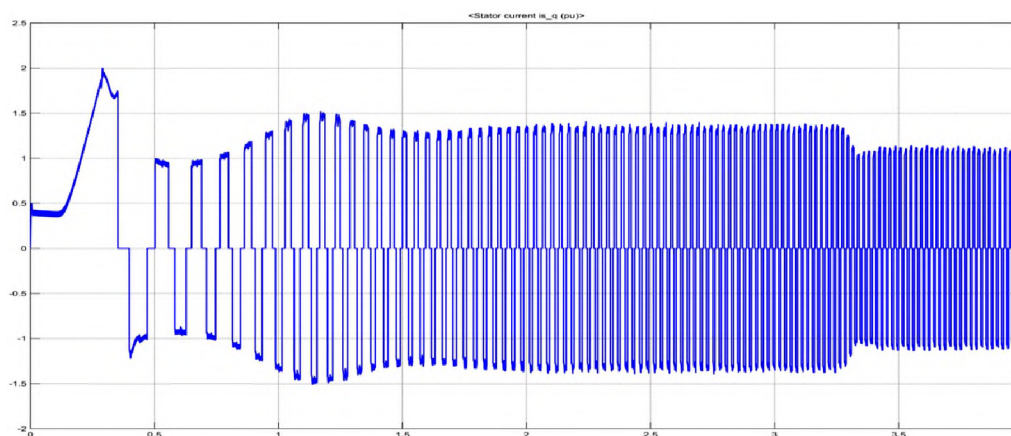


Рис. 14. Графики тока статора СД по оси q при пусковом режиме

Fig. 14. Graphs of the current of the SM stator along the q axis in the starting mode

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Моделирование параметров ЭП с СД выполнено в относительных единицах, в режиме пуска СД с ИТ получены следующие результаты: токи статора при пуске увеличились в 1,6 и 2 раза относительно номинального значения в рассматриваемых осях координат, скорость и момент СД изменились аналогично характеристикам АД (рисунок 9), что свидетельствует об эффективности использования способа пуска. По паспортным данным СД, при прямых пусках пусковые токи обычно составляют $4-8I_n$, при использовании УПП эти значения составляют примерно $3-8I_n$.

Выводы

Использование ПЧ на основе зависимого ИТ для плавного пуска двигателей крупных НА является эффективным техническим решением. Внедрение современных систем в ЭП НА позволяет экономить электроэнергию и увеличить технический ресурс электрооборудования. Основные выводы работы заключаются в следующем:

1. В настоящее время широкое применение получили ПЧ с элементами постоянного тока, где на первом этапе переменный ток преобразуется в постоянный с помощью выпрямителя, а затем, на втором этапе, с помощью инвертора постоянный ток преобразуется в переменный.
2. Использование УПП в качестве средства плавного пуска ЭД является эффективным, при случае если регулирования скорости не требуется.
3. Перспективным способом пуска высоковольтных ЭД является использование ИТ, где на выходе преобразователя формируется ток определенной формы.
4. Применение ПЧ на основе ИТ целесообразно для ЭП с двигателями большой мощности также в случае необходимости обеспечения режима рекуперации электроэнергии в сеть.
5. Плавный пуск ЭД с глубоким регулированием пускового тока способствует к увеличению технического ресурса электрооборудования и надежности его работы.

Литература

1. Нейман З.Б. и др. Крупные вертикальные электродвигатели переменного тока. - М.: Энергия, 1974. 375 с. ил.
2. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. - М.: Энергия, 1972. 240 с. ил.
3. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоудных установках. - М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с. ил.
4. Ларионов В.Н., Калинин А.Г. Энергоэффективность и энергосбережение в электроприводах с вентиляторной нагрузкой. - Чебоксары: Изд-во. Чуваш. Ун-та, 2012. - 146 с.
5. Калинин, А.Г. Исследование и разработка энергоэффективных режимов электроприводов в системах электроснабжения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Чебоксары 2011.

6. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах/ А. Д. Поздеев – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. - 172 с.
7. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац; пер. с нем. – М. Л.: Госэнергоиздат, 1963. - 735 с.
8. Дадабаев Ш.Т., Грачева Е.И. Техничко-экономическое обоснование применения системы плавного пуска для высоковольтных электродвигателей насосных агрегатов. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 1. С. 141-150.
9. Дадабаев Ш.Т. Моделирование режимов пуска высоковольтного синхронного электропривода с устройством плавного пуска. В сборнике: САПР и моделирование в современной электронике. Сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции. Под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. 2017. С. 91-94.
10. Дадабаев Ш.Т. Компьютерное моделирование нагрева синхронных электроприводов насосных агрегатов при различных способах пуска. В сборнике: Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017). труды Международной научно-технической конференции. 2017. С. 76-80.
11. Дадабаев Ш.Т. Компьютерное моделирование инвертора тока используемое для пуска высоковольтных электродвигателей. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 2. С. 370-375.
12. Дадабаев Ш.Т. Обзор и оценка способов управления насосными установками. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 12. С. 28-30.
13. Сафин А.Р., Хуснутдинов Р.Р., Копылов А.М., и др. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма. Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 4 (40). С. 77-85.
14. Tsvetkov A.N., Kornilov V.Yu., Safin A.R., et al. An experimental bench for the study of electric drives of a horsehead pump // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems (JARDCS) ISSN: 1943-012X, Volume-12, 05 - SPECIAL ISSUE. 2020. pp. 1294-1298. (DOI: 10.5373/JARDCS/V12SP5/20201888)
15. Dadabaev S.T., Dadabaeva Z.A., Gracheva E.I. Study of starting transition processes of asynchronous motor at a lowered mains voltage frequency. Sustainable Energy Systems: innovative perspectives. Conference proceedings. Сер. "Lecture Notes in Civil Engineering" 2021. С. 206-213.
16. Petrov T.I., Safin A.R. Modification of the synchronous motor model for topological optimization. E3S Web of Conferences, 2020, 178, 01016
17. A. Safin, A. Kopylov, R. Gibadullin, et al. Thermal Model of a Linear Electric Machine, 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2019, pp. 426-428. (DOI: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947532)
18. Дадабаев Ш.Т., Грачева Е.И., Каримов И.Р., Валтчев С. Исследование пусковых режимов асинхронных двигателей при низком качестве электроэнергии питающей сети. Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 1 (49). С. 3-15.
19. Грачева Е.И., Алимова А.Н., Абдуллазянов Р.Э. Анализ и способы расчета потерь активной мощности и электроэнергии в низковольтных цеховых сетях. Вестник КГЭУ 2018. № 4 (40). С. 53-65.
20. P. C. Sen, Principle of Electric Machines and Power Electronics, 3rd Edition, Wiley, 2013.
21. Тошходжаева М.И., Ходжиев А.А. Математическая модель влияния природных и эксплуатационных факторов на надёжность ВЛЭП-110 кВ в условиях резко континентального климата. Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 1 (45). С. 71-81.
22. Gracheva E.I., Naumov O.V. Estimation of Power Losses in Electric Devices of the Electrotechnical Complex. - International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), (2019). – 6.
23. Nevelsteen, J. & Aragon, H., Starting of Large Motors – Methods and Economics, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 6, pp. 1012-1018, November/December 1989.
24. Tolibjonovich D.S., Islomovna T.M., Saidulloevna M.D. (2020). Modeling of starting transition processes of asynchronous motors with reduced voltage of the supply network.

European Journal of Electrical Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 23-28.
<https://doi.org/10.18280/ejee.220103>

25. Gracheva E.I., Toshkhodzhaeva M., Rahimov O., et al. Modeling the reliability of high-voltage power transmission lines taking into account the influence of the parameters of a sharply continental climate. International Journal of Technology. 2020. T. 11. № 8. С. 1557-1569.

Авторы публикации

Дадабаев Шахбоз Толибджонович – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение и Автоматика» Худжандского политехнического института Таджикского технического Университета имени академика М.С. Осими, г. Худжанд, Таджикистан.

Абдуллазянов Эдвард Юнусович – ректор Казанского государственного энергетического университета.

Грачева Елена Ивановна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Neyman ZB. *Krupnyye vertikal'nyye elektrodvigateli peremennogo toka*. - M.: Energiya, 1974. 375 s. il.
2. Onishchenko GB, Yun'kov MG. *Elektroprivod turbomekhanizmov*. - M.: Energiya, 1972. 240 s. il.
3. Leznov BS. *Energosberezheniye i reguliruyemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovok*. - M.: Energoatomizdat, 2006. 360 s. il.
4. Larionov VN, Kalinin AG. *Energoeffektivnost' i energosberezheniye v elektroprivodakh s ventilyatornoy nagruzkoy*. – Cheboksary: Izd-vo. Chuvash. Un-ta, 2012. – 146 s.
5. Kalinin AG. *Issledovaniye i razrabotka energoeffektivnykh rezhimov elektroprivodov v sistemakh elektrosnabzheniya*. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Cheboksary 2011.
6. Pozdeyev AD. *Elektromagnitnyye i elektromekhanicheskiye protsessy v chastotno-reguliruyemykh asinkhronnykh elektroprivodakh/ A. D. Pozdeyev* – Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta, 1998. - 172 p.
7. Kovach KP. *Perekhodnyye protsessy v mashinakh peremennogo toka / K. P. Kovach, I. Rats; per. s nem.* – M. L.: Gosenergoizdat, 1963. - 735 p.
8. Dadabaev ST, Gracheva E.I. Tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye primeneniya sistemy plavnogo puska dlya vysokovol'tnykh elektrodvigateley nasosnykh agregatov. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2022;24(1):141-150.
9. Dadabaev ST. *Modelirovaniye rezhimov puska vysokovol'tnogo sinkhronnogo elektroprivoda s ustroystvom plavnogo puska*. V sbornike: SAPR i modelirovaniye v sovremennoy elektronike. Sbornik nauchnykh trudov I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Pod red. L.A. Potapova, A.YU. Drakina. 2017. pp. 91-94.
10. Dadabaev ST. *Komp'yuternoye modelirovaniye nagreva sinkhronnykh elektroprivodov nasosnykh agregatov pri razlichnykh sposobakh puska*. V sbornike: Perspektivnyye informatsionnyye tekhnologii (PIT 2017). trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 2017. pp. 76-80.
11. Dadabaev S.T. Komp'yuternoye modelirovaniye invertora toka ispol'zuyemoye dlya puska vysokovol'tnykh elektrodvigateley. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskoye nauki*. 2019;2:370-375.
12. Dadabaev ST. Obzor i otsenka sposobov upravleniya nasosnymi ustanovkami. *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont*. 2013;12:28-30.
13. Safin AR, Khusnutdinov RR, Kopylov AM, et al. Razrabotka metoda topologicheskoy optimizatsii elektricheskikh mashin na osnove geneticheskogo algoritma. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2018;4 (40):77-85.
14. Tsvetkov AN, Kornilov VYu, Safin AR, et al. An experimental bench for the study of electric drives of a horsehead pump. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control*

Systems (JARDCS). ISSN: 1943-012X, V.12, 05 - SPECIAL ISSUE. 2020. pp. 1294-1298. (DOI: 10.5373/JARDCS/V12SP5/20201888).

15. Dadabaev ST, Dadabaeva ZA, Gracheva EI. *Study of starting transition processes of asynchronous motor at a lowered mains voltage frequency*. Sustainable Energy Systems: innovative perspectives. Conference proceedings. «Lecture Notes in Civil Engineering». 2021. pp. 206-213.

16. Petrov TI, Safin AR. *Modification of the synchronous motor model for topological optimization*. E3S Web of Conferences, 2020, 178, 01016.

17. Safin A, Kopylov A, Gibadullin R. *Thermal Model of a Linear Electric Machine*, 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2019, pp. 426-428. (doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947532).

18. Dadabaev ST, Gracheva EI, Karimov IR, et al. *Issledovaniye puskovykh rezhimov asinkhronnykh dvigateley pri nizkom kachestve elektroenergii pitayushchey seti*. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2021;13:1 (49):3-15.

19. Gracheva EI, Alimova AN, Abdullazyanov RE. *Analiz i sposoby rascheta poter' aktivnoy moshchnosti i elektroenergii v nizkovol'tnykh tsekhovykh setyakh*. Vestnik KGEU 2018;4 (40):53-65.

20. Sen P.C. *Principle of Electric Machines and Power Electronics*, 3rd Edition, Wiley, 2013.

21. Toshkhodzhaeva MI, Khodzhiyev AA. *Matematicheskaya model' vliyaniya prirodnnykh i ekspluatatsionnykh faktorov na nadozhnost' VLEP-110 kV v usloviyakh rezko kontinental'nogo klimata*. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2020;12:1 (45):71-81.

22. Gracheva EI, Naumov OV. *Estimation of Power Losses in Electric Devices of the Electrotechnical Complex*. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), (2019). 6.

23. Nevelsteen J. & Aragon H. *Starting of Large Motors – Methods and Economics*, IEEE Transactions on Industry Applications, V. 25, No. 6, pp. 1012-1018, November/December 1989.

24. Tolibjonovich DS, Islomovna TM, Saidulloevna M.D. (2020). Modeling of starting transition processes of asynchronous motors with reduced voltage of the supply network. *European Journal of Electrical Engineering*, 2022;1:23-28. <https://doi.org/10.18280/ejee.220103>

25. Gracheva EI, Toshkhodzhaeva M, Rahimov O, et al. Modeling the reliability of high-voltage power transmission lines taking into account the influence of the parameters of a sharply continental climate. *International Journal of Technology*. 2020;11(8):1557-1569.

Authors of the publication

Shakhboz T. Dadabaev – Khujand Polytechnic Institute of the Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Khujand, Tajikistan.

Edvard Yu. Abdullazyanov – Kazan State Power Engineering University.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University.

Шифр научной специальности:

2.4.2. *Электротехнические комплексы и системы (технические науки)*

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

2.4.5 *Энергетические системы и комплексы (технические науки)*

Получено

07.02.2023г.

Отредактировано

21.02.2023г.

Принято

28.02.2023г.

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРИЧЕСКИ ИНВАРИАНТНОГО СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

Малёв Н.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2224-0681>, maleev@mail.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Следящие электроприводы, функционирующие при неизвестном заранее законе изменения задающего воздействия и обеспечивающие воспроизведение выходной координатой данного закона, находят применение в робототехнических и мехатронных системах, станках, системах автоматического контроля и дистанционной передачи информации, радиолокационных станциях, установках наведения и т.п. Эксплуатация следящих электроприводов зачастую протекает в условиях неустойчивости параметров элементов электропривода и корректирующие устройства, синтезированные классическими методами теории управления, не справляются с обеспечением заданной точности воспроизведения входного сигнала и необходимого качества переходных процессов. **ЦЕЛЬ.** В этой связи важной и актуальной задачей является синтез системы активной коррекции с нестационарным регулятором, обеспечивающим за счет алгоритма самонастройки коэффициентов требуемое качество и точность процесса управления. **МЕТОДЫ.** При решении данной задачи применялись методы идентификации параметров на основе градиентного алгоритма и численного интегрирования уравнений динамики объекта исследования, реализованные средствами программной среды MatLab. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В работе решается задача синтеза алгоритма самонастройки коэффициентов корректирующего устройства следящего электропривода на основе идентификационного подхода. Идентификация параметров осуществляется путем беспосредственного градиентного алгоритма при минимизации невязки между объектом исследования и его инверсной моделью, а также восстановлением коэффициентов дифференциальных уравнений с помощью интегрирования и соответствующих вычислительных процедур. Электропривод с отрицательной обратной связью по положению настроен на оптимум по модулю с пропорциональным регулятором, коэффициенты которого определяются идентифицируемыми параметрами. Алгоритм самонастройки состоит в вычислении корректирующего коэффициента нестационарного П-регулятора и формировании мультипликативного канала замкнутого контура активной коррекции. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Моделирование электропривода в программной среде MatLab показало высокую точность и быстродействие процесса идентификации параметров в условиях широкого диапазона их изменения. При формировании контура активной коррекции необходимым требованием является разграничение цикла идентификации и цикла самонастройки, позволяющее избежать сингулярных возмущений и снизить резонансные явления при работе параметрически инвариантного электропривода. Разработанный метод активной коррекции при априорно известной и неизменной структуре модели объекта исследования позволяет обеспечить сохранение требуемой точности и качества функционирования электропривода в условиях параметрических возмущений при допустимых отклонениях точностных и качественных показателей. Реализация метода не требует дополнительного оборудования, организации специальных тестовых сигналов, существенных вычислительных затрат. Метод синтеза параметрически инвариантного электропривода может применяться для разработки робастных систем управления нестационарными объектами, в том числе при невыполнении гипотезы квазистационарности.

Ключевые слова: алгоритм; параметрическая идентификация; следящий электропривод; самонастройка; активная коррекция; регулятор; качество управления; точность.

Для цитирования: Малёв Н.А. Синтез параметрически инвариантного следящего электропривода с применением метода восстановления параметров модели // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 40-57. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-40-57.

SYNTHESIS OF A PARAMETRICALLY INVARIANT SERVO DRIVE USING THE MODEL PARAMETERS RECOVERY METHOD

NA. Malev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2224-0681>, maleev@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Servo drives operate with a law of change of the setting action unknown in advance and provide reproduction of this law by the output coordinate. Servo drives find application in robotic and mechatronic systems, machine tools, systems of automatic control and remote transmission of information, radar stations, guidance units, etc. The operation of servo drives often proceeds in conditions of instability parameters and characteristics elements of the electric drive. Corrective devices synthesized by classical methods of automatic control theory cannot cope with providing the specified accuracy of reproduction of the input signal and the required quality of transients. *THE PURPOSE.* In this regard, an important and urgent task is the synthesis of an active correction system with a non-stationary controller that provides the required quality and accuracy of the control process due to the coefficient self-tuning algorithm. *METHODS.* When solving this problem, methods for identifying parameters based on the gradient algorithm and numerical integration of the object of study dynamics equations, implemented by means of the MatLab software environment, were used. *RESULTS.* The paper solves the problem of synthesizing the self-tuning algorithm for the coefficients of the servo drive corrective device based on the identification approach. The parameters are identified by a searchless gradient algorithm while minimizing the discrepancy between the object of study and its inverse model, as well as restoring the coefficients of differential equations using integration and the corresponding computational procedures. An servo drive with negative position feedback is tuned to the modular optimum with a proportional controller whose coefficients are completely determined by the parameters to be identified. The self-tuning algorithm consists in calculating the correction factor of the non-stationary P-controller and forming a multiplicative channel of the active correction closed loop. *CONCLUSION.* The simulation of the electric drive in the MatLab software environment showed high accuracy and quickness of the process identifying parameters in a wide range of their change. When forming an active correction contour, a necessary requirement is to distinguish between the identification cycle and the self-tuning cycle. This makes it possible to avoid singular perturbations and reduce resonant facts during the operation of a parametrically invariant electric drive. The developed method of active correction with a priori known and unchanged structure of the object model of study makes it possible to maintain the required accuracy and quality of the operation of the electric drive under conditions of parametric disturbances with permissible deviations of accuracy and quality indicators. Implementation of the method does not require additional equipment, organization of special test signals, significant computational costs. The method of synthesizing a parametrically invariant electric drive can be used to develop robust control systems for non-stationary objects, including when the hypothesis of quasi-stationarity is not fulfilled.

Keywords: algorithm; parametric identification; servo drive; self-tuning; active correction; controller; control quality; accuracy.

For citation: Malev NA. Synthesis of a parametrically invariant servo drive using the model parameters recovery method. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(2):40-57. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-40-57.

Введение

Синтез систем управления следящих электроприводов на основе принципов подчиненного регулирования координат с формированием соответствующих обратных связей и расчетом корректирующих устройств позволяет получить требуемые переходные процессы и точные показатели функционирования системы, как в режиме позиционирования, так и в режиме слежения [1, 2, 3, 4]. Следящие электроприводы являются астатическими системами и обладают свойством невосприимчивости регулируемой выходной величины к внешним координатным возмущениям в установившихся режимах работы [5, 6, 7]. Корректирующие устройства синтезируются с применением желаемых математических моделей на основе номинальных значений параметров электропривода. Однако в процессе функционирования параметры элементов электропривода имеют тенденцию к отклонению от номинальных значений в силу влияния различного рода дестабилизирующих факторов [8, 9, 10]. В этой связи актуальной является

задача синтеза параметрически инвариантного следящего электропривода, обладающего свойством малой или нулевой чувствительности к флуктуациям параметров и сохраняющего работоспособность и требуемое качество функционирования в статических и динамических режимах работы в условиях широкого диапазона изменения характеристик элементов системы [11, 12]. В данных условиях традиционные методы синтеза, как правило, не способны обеспечить выполнения предъявляемых к электроприводу требований, что приводит к использованию для решения поставленной задачи теории адаптивных систем управления.

В многообразии подобных систем выделяют два больших класса – самоорганизующиеся и самонастраивающиеся адаптивные системы [13, 14]. Первый класс предполагает синтез электропривода с корректирующим устройством свободной структуры, что позволяет получить требуемое качество функционирования не только при параметрической, но и при структурной неопределенности объекта управления. Самоорганизующиеся системы ориентированы на использование сложных алгоритмов управления, реализация которых не всегда возможна с практической точки зрения [15, 16].

Класс самонастраивающихся систем находит применение в случаях, когда структура объекта управления известна, а изменению подвержены только его параметры [17]. В таких системах структура корректирующего устройства может быть получена традиционными методами и решается задача определения алгоритма самонастройки коэффициентов регулятора в зависимости от изменения параметров объекта [18]. Самонастраивающиеся системы, в свою очередь, подразделяются на подклассы поисковых систем, предполагающих организацию специальных поисковых сигналов, обеспечивающих экстремум показателя качества функционирования, и беспоисковых систем, характеризующихся аналитическим алгоритмом определения экстремума показателя качества [19]. Беспоисковые самонастраивающиеся системы могут быть построены на основе принципа прямого адаптивного управления с эталонной моделью, функционирующие таким образом, чтобы за счет настройки коэффициентов регулятора свести к нулю невязку между объектом и эталонной моделью [20], либо представляют собой системы идентификационного типа, функционирующие на принципах непрямого адаптивного управления, когда на основе вычисления оценок параметров объекта определяются соответствующие коэффициенты корректирующего устройства [21].

Рассмотренный в настоящей работе метод синтеза параметрически инвариантного следящего электропривода предполагает использование идентификационного подхода с восстановлением параметров математической модели электропривода с одновременным применением принципа прямого адаптивного управления за счет формирования замкнутого контура самонастройки коэффициентов регулятора [17, 20, 21].

Материалы и методы

При синтезе следящего электропривода, когда закон изменения выходной координаты заранее неизвестен, для определения максимальных скорости и ускорения объекта управления, а также требуемой мощности исполнительного электродвигателя целесообразно использовать метод эквивалентного рабочего цикла, представляющего собой периодическую функцию времени [22].

Наиболее характерным эквивалентным циклом для следящего электропривода является синусоидальный цикл. Тогда угол поворота вала α , скорость ω и ускорение ε исполнительного электродвигателя определяются по формулам:

$$\begin{aligned}\alpha &= \alpha_{\max} \sin \omega t ; \\ \omega &= \alpha_{\max} \omega \cos \omega t = \omega_{\max} \cos \omega t ; \\ \varepsilon &= -\alpha_{\max} \omega^2 \sin \omega t = -\varepsilon_{\max} \sin \omega t ,\end{aligned}$$

где $\omega = \frac{2\pi}{T}$, T – период эквивалентного цикла.

Вращающий момент двигателя $M_{\text{дв}}$ в данном случае должен быть не меньше эквивалентного момента $M_{\text{экв}}$

$$M_{\text{дв}} \geq M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T M_{\text{дв}}^2 dt} . \quad (1)$$

При синусоидальном рабочем цикле и постоянном статическом моменте сопротивления нагрузки

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{2} M_{\text{дин.мах}}^2 + M_{\text{с}}^2} . \quad (2)$$

Динамический момент на валу двигателя, с учетом приведенных к валу момента инерции редуктора $J_{ред}$ и момента инерции нагрузки $J_{нагр}$

$$M_{дин} = J_{\Sigma} i \varepsilon_{max} = \left(J_{дв} + J_{ред} + \frac{J_{нагр}}{i^2 \eta} \right) i \varepsilon_{max}, \quad (3)$$

где i и η – передаточное отношение и КПД редуктора; $J_{дв}$ – момент инерции двигателя.

Окончательно эквивалентный момент

$$M_{эkv} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(J_{дв} + J_{ред} + \frac{J_{нагр}}{i^2 \eta} \right)^2 i^2 \varepsilon_{эkv}^2 + \frac{M_c^2}{i^2 \eta^2}}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{эkv} = \frac{\varepsilon_{max}}{\sqrt{2}}$ – среднеквадратичное значение ускорения.

Для определения оптимального передаточного отношения редуктора i_o введем в выражение (4) замену $J_{дв} + J_{ред} = J_{д-р}$ и исследуем его на минимум по величине i

$$\begin{aligned} \frac{d}{di} \left[\left(J_{д-р} + \frac{J_{нагр}}{i^2 \eta} \right)^2 i^2 \varepsilon_{эkv}^2 + \frac{M_c^2}{i^2 \eta^2} \right] &= 0; \\ J_{д-р}^2 \varepsilon_{эkv}^2 i^4 - \frac{J_{нагр}^2}{\eta^2} \varepsilon_{эkv}^2 - \frac{M_c^2}{\eta^2} &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

откуда

$$i_o = \sqrt{\frac{J_{нагр} + \frac{M_c^2}{\eta^2 \varepsilon_{эkv}^2}}{J_{д-р}^2}}. \quad (6)$$

Подставим значение (6) в (4) и получим

$$M_{эkv.min} = \sqrt{2 J_{д-р} \varepsilon_{эkv} \left(\sqrt{\frac{J_{нагр}^2}{\eta^2} \varepsilon_{эkv}^2 + \frac{M_c^2}{\eta^2}} + \frac{J_{нагр}}{\eta} \varepsilon_{эkv} \right)}. \quad (7)$$

Однако, величина $J_{д-р}$ в подкоренном выражении неизвестна, и определить эквивалентный момент по формуле (7) невозможно.

Полагая, что максимальная скорость вращения исполнительного двигателя следящего электропривода $\omega_{дв.max} = \omega_{max} i$ и устанавливая допустимое кратковременное превышение скорости выше номинальной с коэффициентом $a = 1,2$, так, что $\omega_{дв.max} = a \omega_{дв.ном}$, запишем

$$\omega_{дв.ном} = \frac{\omega_{max} i}{a}.$$

Номинальную скорость вращения двигателя, которая соответствует оптимальному числу редуктора при некотором значении коэффициента a , обозначим

$$\omega_{дв.o} = \frac{\omega_{max} i_o}{a} \quad (8)$$

и на основании выражений (8) и (5) получим равенство

$$a \omega_{дв.o} = \omega_{max} \sqrt[4]{\frac{J_{нагр}^2 + \frac{M_c^2}{\eta^2 \varepsilon_{эkv}^2}}{J_{д-р}^2}}. \quad (9)$$

Величина оптимальной скорости по формуле (9) также не может быть определена из-за неизвестного момента инерции $J_{д-р}$.

Введем зависящие только от параметров нагрузки и закона движения объекта управления эквивалентные коэффициенты $\gamma_{эkv}$ и $\beta_{эkv}$, которые определяются из соотношений (7) и (9), а также пренебрежем на начальном этапе расчетов параметрами редуктора:

$$\gamma_{\text{ЭКВ}} = \frac{M_{\text{ЭКВ}}}{\sqrt{J_{\text{ДВ}}}} = \sqrt{2\varepsilon_{\text{ЭКВ}} \left(\sqrt{\frac{J_{\text{нагр}}^2}{\eta^2} \varepsilon_{\text{ЭКВ}}^2 + \frac{M_c^2}{\eta^2}} + \frac{J_{\text{нагр}}}{\eta} \varepsilon_{\text{ЭКВ}} \right)}; \quad (10)$$

$$\frac{\beta_{\text{ЭКВ}}}{a} = \omega_{\text{ДВ.о}} \sqrt{J_{\text{ДВ}}} = \frac{\omega_{\text{max}}}{a} \sqrt{4 \frac{J_{\text{нагр}}^2}{\eta^2} + \frac{M_c^2}{\eta^2 \varepsilon_{\text{ЭКВ}}^2}}. \quad (11)$$

Тогда, полагая, что номинальный момент исполнительного двигателя

$$M_{\text{ДВ.ном}} = \gamma_{\text{ЭКВ}} \sqrt{J_{\text{ДВ}}} = M_{\text{ЭКВ.мин}},$$

а его номинальная скорость вращения

$$\omega_{\text{ДВ.ном}} = \frac{\beta_{\text{ЭКВ}}}{a \sqrt{J_{\text{ДВ}}}} = \omega_{\text{ДВ.о}},$$

запишем формулу для определения мощности двигателя

$$P_{\text{ДВ.ном}} = M_{\text{ДВ.ном}} \omega_{\text{ДВ.ном}} = \frac{\gamma_{\text{ЭКВ}} \sqrt{J_{\text{ДВ}}}}{a \sqrt{J_{\text{ДВ}}}} \beta_{\text{ЭКВ}} = \frac{\gamma_{\text{ЭКВ}} \beta_{\text{ЭКВ}}}{a} = P_{\text{ЭКВ.мин}}.$$

После выбора двигателя по коэффициентам $\gamma_{\text{ЭКВ}}$ и $\beta_{\text{ЭКВ}}$ определяем передаточное отношение редуктора по формуле

$$i = \frac{a \omega_{\text{ДВ.ном}}}{\omega_{\text{max}}}, \quad (12)$$

рассчитываем его КПД и момент инерции, а затем – величину среднеквадратичного момента $M_{\text{ЭКВ}}$ по формуле (4). Затем необходимо проверить выполнение условия

$$M_{\text{ДВ.ном}} \geq M_{\text{ЭКВ}},$$

определить требуемый момент

$$M_{\text{ДВ.тр}} = \left(J_{\text{ДВ}} + J_{\text{ред}} + \frac{J_{\text{нагр}}}{i^2 \eta} \right) i \varepsilon_{\text{max}} + \frac{M_c}{i \eta}$$

и провести проверку на кратковременную перегрузку по моменту

$$\frac{M_{\text{ДВ.тр}}}{M_{\text{ДВ.ном}}} \leq 2.$$

Проверка требования по увеличению скорости вращения $\frac{\omega_{\text{ДВ.мах}}}{\omega_{\text{ДВ.ном}}} \leq a$ в данном

случае не требуется.

Если хотя бы одна из проверок выявит несоответствие режима работы двигателя допустимому, то следует из ряда двигателей выбранной серии взять двигатель большей мощности и повторить расчеты.

На следующем этапе производится выбор и расчет управляемого электрического преобразователя и датчиков координат электропривода, по которым организуются отрицательные обратные связи замкнутой системы управления.

Как было отмечено выше, при синтезе корректирующих устройств хорошо себя зарекомендовал способ последовательной коррекции и, в частности, метод стандартных настроек на оптимум по модулю или симметричный оптимум [23, 24]. После расчета корректирующих устройств, проводится проверка синтезированного следящего электропривода на соответствие предъявляемым требованиям по точности воспроизведения задающего воздействия и качеству переходных процессов в условиях координатных и параметрических возмущений. В зависимости от порядка астатизма системы влияние координатных возмущений на регулируемые величины может быть сведено к нулю или уменьшено до допустимого минимального уровня, однако параметрические возмущения могут привести к существенным отклонениям выходных координат от требуемых значений и показателей, как в переходном, так и в установившемся режимах.

В этой связи следующий этап синтеза направлен на формирование алгоритма, обеспечивающего параметрическую инвариантность следящего электропривода в условиях широкого диапазона изменений параметров.

В основу данного алгоритма положен метод восстановления параметров модели, структура которой априорно известна и может быть представлена математической моделью в операторной форме

$$W(s) = \frac{A(s)}{U_{in}(s)} = \frac{K \sum_{k=0}^m b_k s^k}{\sum_{k=0}^n a_k s^k} = \frac{K(s^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0)}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}, \quad m \leq n, \quad (13)$$

где $A(s), U_{in}(s)$ – выходная и входная координаты следящего электропривода.

Выражению (13) соответствует дифференциальное уравнение

$$\begin{aligned} & \frac{d^n \alpha(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} \alpha(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d\alpha(t)}{dt} + a_0 \alpha(t) = \\ & = K \left[\frac{d^m u_{in}(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u_{in}(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du_{in}(t)}{dt} + b_0 u_{in}(t) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Проинтегрируем (14) n раз и получим

$$\begin{aligned} & \alpha(t) + a_{n-1} \int_0^t \alpha(t) dt + \dots + a_1 \int_0^t \dots \int_0^t \alpha(t) (dt)^{n-1} + a_0 \int_0^t \dots \int_0^t \alpha(t) (dt)^n = \\ & = K \left[\int_0^t \dots \int_0^t u_{in}(t) (dt)^{n-m} + b_{m-1} \int_0^t \dots \int_0^t u_{in}(t) (dt)^{n-m+1} + \dots + b_0 \int_0^t \dots \int_0^t u_{in}(t) (dt)^n \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

При нулевых начальных условиях из выражения (15) можно получить соотношения для определения параметров модели (14). Так, коэффициент передачи разомкнутой системы

$$K = \frac{\alpha(t) + a_{n-1} \int_0^t \alpha(t) dt + \dots + a_1 \int_0^t \dots \int_0^t \alpha(t) (dt)^{n-1} + a_0 \int_0^t \dots \int_0^t \alpha(t) (dt)^n}{\int_0^t \dots \int_0^t u_{in}(t) (dt)^{n-m} + b_{m-1} \int_0^t \dots \int_0^t u_{in}(t) (dt)^{n-m+1} + \dots + b_0 \int_0^t \dots \int_0^t u_{in}(t) (dt)^n}. \quad (16)$$

Параметры левой части (14) или знаменателя (13) определяются из соотношений

$$\left\{ \begin{aligned} a_{n-1} &= \frac{K[\cdot] - \alpha(t) - \dots - a_1 \int_0^t \dots \int_0^t \alpha(t) (dt)^{n-1} - a_0 \int_0^t \dots \int_0^t \alpha(t) (dt)^n}{\int_0^t \alpha(t) dt}; \\ a_{n-2} &= \frac{K[\cdot] - \alpha(t) - a_{n-1} \int_0^t \alpha(t) dt - \dots - a_1 \int_0^t \dots \int_0^t \alpha(t) (dt)^{n-1} - a_0 \int_0^t \dots \int_0^t \alpha(t) (dt)^n}{\int_0^t \int_0^t \alpha(t) (dt)^2}; \\ &\dots \\ a_1 &= \frac{K[\cdot] - \alpha(t) - a_{n-1} \int_0^t \alpha(t) dt - \dots - a_0 \int_0^t \dots \int_0^t \alpha(t) (dt)^n}{\int_0^t \dots \int_0^t \alpha(t) (dt)^{n-1}}; \\ a_0 &= \frac{K[\cdot] - \alpha(t) - a_{n-1} \int_0^t \alpha(t) dt - \dots - a_1 \int_0^t \dots \int_0^t \alpha(t) (dt)^{n-1}}{\int_0^t \dots \int_0^t \alpha(t) (dt)^n}. \end{aligned} \right. \quad (17)$$

Подобным образом можно получить выражения для определения коэффициентов правой части (14) или числителя (13).

Рассмотрим на простом примере применение метода восстановления параметров для системы первого порядка с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{K}{s+a}.$$

Запишем соответствующее дифференциальное уравнение

$$\frac{du_{out}(t)}{dt} + au_{out}(t) = Ku_{in}(t)$$

и проинтегрируем его

$$u_{out}(t) - u_{out}(0) + a \int_0^t u_{out}(t) dt = K \int_0^t u_{in}(t) dt.$$

Определим коэффициент передачи K и полюс a исследуемой системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} K = \frac{a \int_0^t u_{out}(t) dt + u_{out}(t) - u_{out}(0)}{\int_0^t u_{in}(t) dt}; \\ a = \frac{K \int_0^t u_{in}(t) dt - u_{out}(t) + u_{out}(0)}{\int_0^t u_{out}(t) dt}. \end{array} \right. \quad (18)$$

Анализ полученных выражений позволяет сделать вывод, что система уравнений (18) несовместна и не имеет решений.

Тем не менее, в работах [25, 26] апробирован градиентный метод вычисления общего коэффициента передачи K электропривода с применением инверсного идентификатора, и его совместное использование с методом восстановления параметров модели позволяет прогнозировать положительный результат при решении задачи синтеза параметрически инвариантного электропривода на основе идентификационного подхода к построению алгоритма самонастройки параметров корректирующего устройства в функции изменения параметров исследуемой системы.

Результаты и обсуждение

В качестве объекта исследования рассмотрим нескорректированный астатический следящий электропривод малой мощности с передаточной функцией разомкнутой системы

$$W_o(s) = \frac{U_\alpha(s)}{U_{вх}(s)} = \frac{K_y K_{дв} K_p K_{дп}}{s(T_M s + 1)} = \frac{K}{s(T_M s + 1)}, \quad (19)$$

где $K = K_y K_{дв} K_p K_{дп}$ – общий коэффициент передачи электропривода; T_M – электромеханическая постоянная времени исполнительного электродвигателя; K_y – коэффициент передачи усилителя мощности; $K_{дв}$ – коэффициент передачи исполнительного электродвигателя; $K_p = 1/i_o$ – коэффициент передачи редуктора; $K_{дп}$ – коэффициент передачи датчика положения.

На основании эквивалентного рабочего цикла $\alpha = \alpha_{\max} \sin \omega t$ с максимальным углом поворота $\alpha_{\max} = 180^\circ = \pi$ рад и круговой частотой рабочего цикла $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0,1} = 62,83 \text{ с}^{-1}$ была определена требуемая мощность и выбран исполнительный асинхронный двухфазный электродвигатель с полым немагнитным ротором серии ДИД, технические характеристики которого сведены в таблицу.

Технические характеристики исполнительного электродвигателя

Specification of Electric Drive

Тип двигателя	$P_{2\max}$, Вт	M_{II} , мН·м	n_0 , об/мин	T_M , с	U , В	$J_{дв} \cdot 10^{-6}$, кг·м ²
ДИД-5ТА	5	21,56	6000	0,075	30	0,25

На основании технических характеристик получена передаточная функция исполнительного электродвигателя

$$W_{\text{дв}}(s) = \frac{A(s)}{U_y(s)} = \frac{K_{\text{дв}}}{s(T_M s + 1)} = \frac{41}{s(0,075s + 1)}.$$

Двигатель получает питание от безынерционного усилителя мощности типа УЗ30.Р2 М с передаточной функцией $W_y(s) = K_y = 7$.

Согласно выражению (12) при круговой частоте вращения двигателя $\omega_{\text{дв}} = 628,32 \text{ рад/с}$ и максимальной круговой частоте синусоидального рабочего цикла $\omega_{\text{max}} = 197 \text{ рад/с}$ передаточное число редуктора $i_0 = 4$, т.е. $W_p(s) = K_p = 0,25$.

В качестве выходной координаты исследуемого следящего электропривода принято напряжение на выходе датчика положения U_α , что позволило рассматривать систему с единичной обратной связью. Передаточная функция датчика положения, синусно-косинусного вращающегося трансформатора типа ВТМ-4А,

$$W_{\text{дп}}(s) = K_{\text{дп}} = \frac{U_\alpha}{\alpha_{\text{max}}} = \frac{15}{\pi} = 4,8 \text{ В/рад}.$$

Тогда номинальный коэффициент передачи разомкнутого нескорректированного следящего электропривода $K = K_y K_{\text{дв}} K_p K_{\text{дп}} = 7 \cdot 41 \cdot 0,25 \cdot 4,8 = 344,4 \text{ с}^{-1}$.

Корректирующее устройство синтезируем при настройке контура положения на оптимум по модулю [24] с желаемой передаточной функцией разомкнутой системы

$$W_{\text{ом}}(s) = \frac{1}{2T_\mu s(T_\mu s + 1)} \quad (20)$$

и определим его передаточную функцию

$$W_{\text{кы}}(s) = \frac{W_{\text{ом}}(s)}{W_o(s)} = \frac{\frac{1}{2T_\mu s(T_\mu s + 1)}}{\frac{K}{s(T_M s + 1)}} \bigg|_{T_\mu = T_M} = \frac{1}{2T_M K}. \quad (21)$$

Далее, в соответствии с алгоритмом вычисления оценки общего коэффициента передачи электропривода [25, 26], определим передаточную функцию инверсной модели. Замкнем единичную обратную связь по выходной координате электропривода и запишем передаточную функцию относительно сигнала рассогласования с учетом корректирующего устройства

$$\Phi_\Delta(s) = \frac{\Delta U(s)}{U_{\text{вх}}(s)} = \frac{1}{1 + W_{\text{кы}}(s)W_y(s)W_{\text{дв}}(s)W_p(s)W_{\text{дп}}(s)} = \frac{s(T_M s + 1)}{s(T_M s + 1) + KK_{\text{кы}}}. \quad (22)$$

где $KK_{\text{кы}} = K' = \cancel{K} \frac{1}{2T_M \cancel{K}} = \frac{1}{2T_M} = \frac{1}{2 \cdot 0,075} = 6,667 \text{ с}^{-1}$ – общий коэффициент передачи скорректированного электропривода.

Передаточная функция инверсной модели

$$\Phi_\Delta^{\text{им}}(s) = \frac{U_{\text{им}}(s)}{\Delta U(s)} = \frac{s(T_M s + 1) + K'}{s(T_M s + 1)} = 1 + \frac{K'}{s(T_M s + 1)}. \quad (23)$$

Продифференцируем выражение (23) по величине K'

$$\frac{\partial \Phi_\Delta^{\text{им}}(s)}{\partial K'} = \frac{1}{s(T_M s + 1)} \quad (24)$$

и отметим, что функция чувствительности $\frac{\partial \Phi_\Delta^{\text{им}}(s)}{\partial K'}$ не зависит от K' и общий коэффициент передачи скорректированного электропривода является идентифицируемым параметром.

Дифференциальное уравнение замкнутого скорректированного электропривода на основании (19) и (21):

$$T_M \frac{d^2 u_\alpha(t)}{dt^2} + \frac{du_\alpha(t)}{dt} + K' u_\alpha(t) = K' u_{\text{вх}}(t). \quad (25)$$

Проинтегрируем выражение (25) и запишем соотношение для вычисления электромеханической постоянной времени T_M с применением формул (17):

$$T_M = \frac{K' \int_0^t \int_0^t u_{BX}(t) dt^2 - \int_0^t u_{\alpha}(t) dt - K' \int_0^t \int_0^t u_{\alpha}(t) dt^2}{u_{\alpha}(t)}. \quad (26)$$

Структурная схема вычисления оценок K' и T_M исследуемого следящего электропривода показана на рис. 1.

Вычисление K' осуществляется с применением функции чувствительности инверсной модели по коэффициенту передачи скорректированного электропривода (24) в соответствии с выражением

$$\begin{aligned} K'(s) &= -\frac{2\lambda_1}{s} [U_{BX}(s) - U_{im}(s)] \left[-\frac{\partial U_{im}(s)}{\partial K'} \right] = \\ &= -\frac{2\lambda_1}{s} [U_{BX}(s) - U_{im}(s)] \left[-\frac{\partial \Phi_{\Delta}^{im}(s)}{\partial K'} \Delta U(s) \right], \end{aligned} \quad (27)$$

реализованном в блоке «Инверсный идентификатор K' ».

Вычисление T_M осуществляется в соответствии с выражением (26) в блоке «Вычислитель T_M ».

Полученные выше выражения и сформированная на их основе структурная схема, показанная на рис. 1, позволяет реализовать соответствующую Simulink-модель вычисления оценок общего коэффициента передачи скорректированного следящего электропривода и электромеханической постоянной времени асинхронного исполнительного электродвигателя с применением программной среды *MatLab*. Соответствующая модель представлена на рисунке 2.

Коэффициенты λ_1 и λ_2 на схеме рисунке 1 характеризуют скорость процесса идентификации оцениваемых параметров электропривода и выбираются путем компьютерного эксперимента. Принимаем $\lambda_1 = 1000$, $\lambda_2 = 500$.

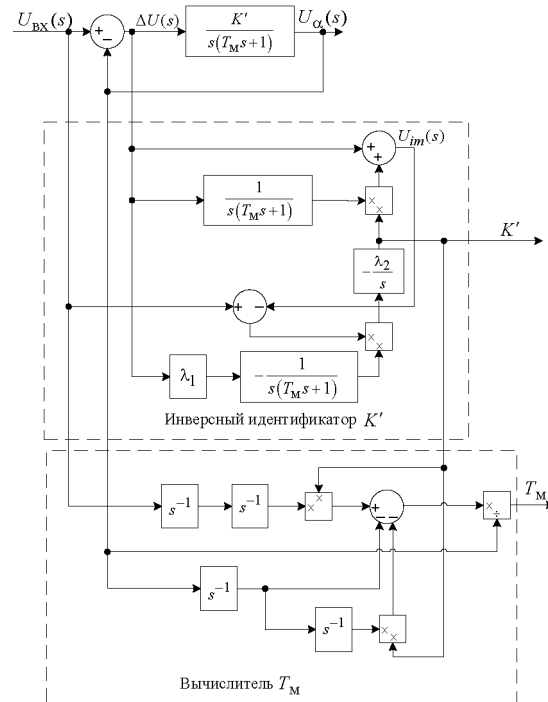


Рис. 1. Структурная схема вычисления оценок K' и T_M следящего электропривода

Fig. 1. Structural diagram for calculating the evaluations K' and T_M of the servo drive

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

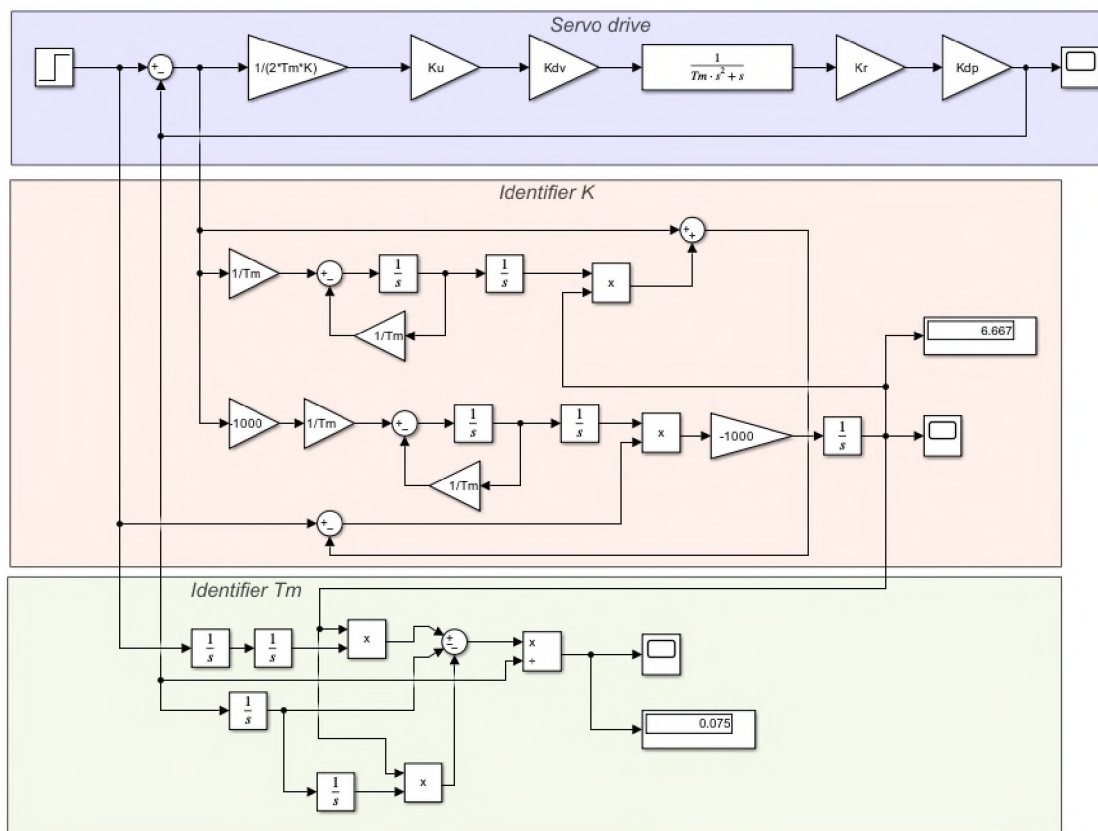


Рис. 2. Simulink-модель вычисления оценок K' и T_M следящего электропривода

Fig. 2. Simulink model for calculating the evaluations K' and T_M of the servo drive

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Результаты моделирования процесса вычисления оценок представлены на рисунках 3 и 4.

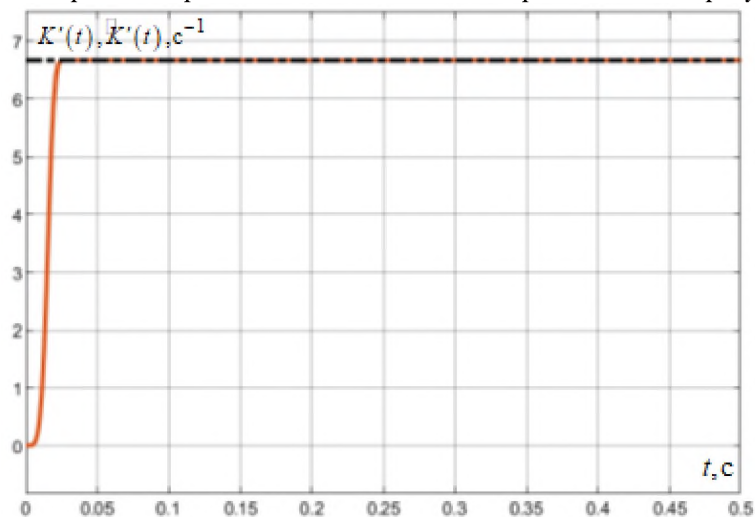


Рис. 3. Результаты моделирования процесса вычисления K'

Fig. 3. Results of simulation of the calculation process K'

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

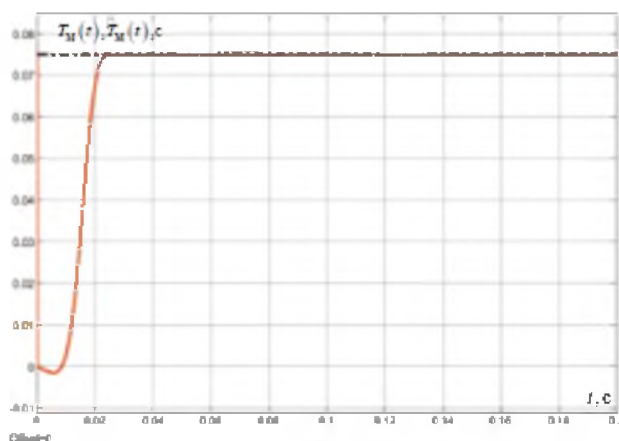


Рис. 4. Результаты моделирования процесса вычисления T_M Fig. 4. Results of simulation of the calculation process T_M

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

На рисунках 3 и 4 черной штрихпунктирной линией показаны номинальные значения оцениваемых параметров, а красная сплошная линия иллюстрирует процесс идентификации. Приведенные зависимости показывают, что оценка параметров осуществляется с высоким быстродействием и малым значением погрешности, не превышающем 0,001%. Большое количество наблюдений за результатами компьютерного эксперимента при широком диапазоне изменения идентифицируемых параметров показало, что полученные оценки являются состоятельными, т.е. стремятся по вероятности к истинному значению: $\lim_{k \rightarrow \infty} P\left\{\left\|K'(T_M) - K'(T_M)\right\| \geq \varepsilon\right\} \approx 0$, где k – количество наблюдений, ε – ошибка идентификации.

Переходим к формированию алгоритма самонастройки параметров корректирующего устройства в целях обеспечения параметрической инвариантности следящего электропривода в условиях параметрических возмущений.

Примем следующие допущения: 1) моделирование производим без учета момента статического сопротивления нагрузки, что объясняется следующими соображениями. Поскольку при настройке электропривода на оптимум по модулю получена структура пропорционального регулятора, не обеспечивающего системе дополнительный порядок астатизма, то при возмущающем воздействии со стороны момента сопротивления появится моментная составляющая ошибки и в установившемся режиме рассогласование $\Delta u(t) \neq 0$, что приведет к значительной погрешности вычисления K' и, в свою очередь, T_M ; 2) моделирование производим без учета шумов и наводок в цепях управления электропривода.

Способы компенсации координатных возмущений, учитывающих влияние момента статического сопротивления нагрузки при астатической структуре корректирующего устройства, а также при воздействии внешних помех подробно изучены в [25, 26] и в настоящей работе не рассматриваются.

На рисунке 5 показаны графики переходных процессов скорректированного электропривода при номинальных значениях параметров и при увеличении общего коэффициента передачи и электромеханической постоянной времени в два раза.

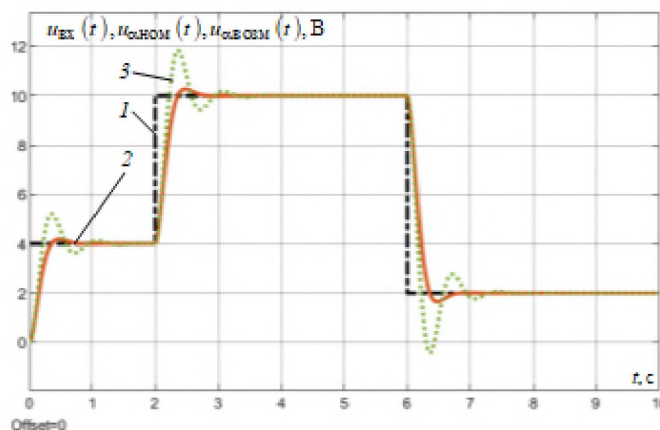


Рис. 5. Графики переходных процессов следящего электропривода: 1 – входное воздействие $u_{BX}(t)$; 2 – выходная координата $u_{аном}(t)$ при номинальных параметрах; 3 – выходная координата $u_{авозм}(t)$ при увеличении параметров в два раза

Fig. 5. Transient processes graphs of the servo drive: 1 – input action $u_{in}(t)$; 2 – output coordinate $u_{anom}(t)$ at nominal parameters; 3 – output coordinate $u_{adis}(t)$ when the parameters are doubled

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Из анализа графиков видно, что при параметрических возмущениях (кривая 3 на рис. 5) перегулирование возросло с 4.3% для оптимизированного электропривода до 20% при несущественном увеличении быстродействия, что говорит о снижении запасов устойчивости и неудовлетворительном функционировании электропривода. При этом заданные детерминированно при моделировании и неконтролируемые в режиме реальной работы возможные изменения K' и T_M , практически недоступные для измерения, будут вычисляться в соответствии с разработанным алгоритмом идентификации (см. рис. 1, 2). Поскольку коэффициенты корректирующего устройства определяются идентифицируемыми параметрами, используем информацию об их изменении для построения аналитического алгоритма самонастройки.

Следует отметить, что формирование передаточной функции корректирующего устройства $W_{кв}(s) = \frac{1}{2T_M K}$ на основе вычисленных оценок K' и T_M с применением

блоков Divide или Product (мультипликативная реализация в прямом канале электропривода) не представляется возможной, поскольку при численном интегрировании в решении возникает сингулярность в виде деления на ноль и симуляция принудительно останавливается. Для устранения данной ошибки следует использовать жёсткий решатель ode23tb на основе неявной формулы Рунге-Кутты, а также блоки задержки на один шаг интегрирования Memory и насыщения Saturation. На начальном этапе работы канала самонастройки выполняется цикл идентификации текущих значений K' и T_M , а затем выполняется цикл настройки коэффициентов корректирующего устройства. Simulink-модель канала самонастройки показана на рисунке 6.

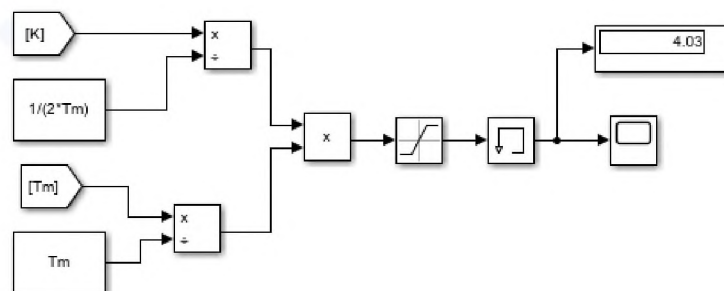


Рис. 6. Simulink-модель канала самонастройки коэффициентов корректирующего устройства

Fig. 6. Simulink model of the self-tuning channel of controller coefficients

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В блоках [K] и [Tm] на рис. 6 вычисляются оценки K' и T_M , которые делятся на номинальные значения соответствующих параметров и на выходе умножителя формируется приращение, которое запоминается в блоке памяти Memory и затем через блок Reciprocal,

вычисляющий обратное значение, мультипликативно вводится в канал управления следящего электропривода, соответствующим образом корректируя коэффициенты регулятора. Представленный на рис. 6 результат $\left(\frac{1}{2T_M}\right)_{\text{отн}} = 4,03\text{c}^{-1}$ соответствует двукратному увеличению общего коэффициента передачи и электромеханической постоянной времени. Процесс вычисления корректирующего коэффициента $\left(\frac{1}{2T_M}\right)_{\text{отн}}$ характеризуется резонансными явлениями, которые ограничиваются блоком насыщения *Saturation* с диапазоном ограничения $\pm 20\text{c}^{-1}$, что отражено на показанной на рисунке 7 временной зависимости.

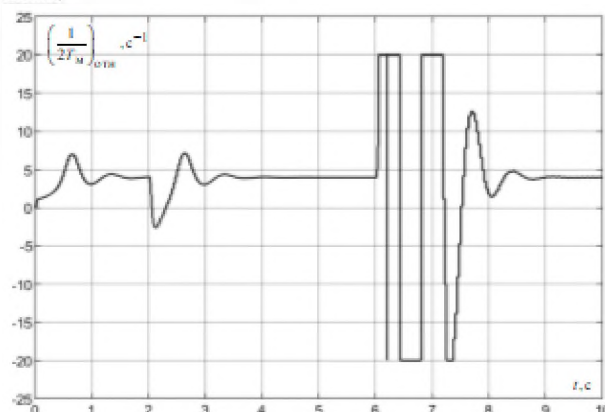


Рис. 7. Временная зависимость корректирующего коэффициента $\left(\frac{1}{2T_M}\right)_{\text{отн}}$ Fig. 7. Time dependence of the correction factor $\left(\frac{1}{2T_M}\right)_{\text{отн}}$

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Как видно из рисунка 7, изменения входного сигнала оказывают влияние на процедуру вычисления корректирующего коэффициента, однако величина $\left(\frac{1}{2T_M}\right)_{\text{отн}}(t)$ сравнительно быстро устанавливается около требуемого значения с погрешностью для данного случая изменения параметров, равной 0,75%.

Результаты моделирования следящего электропривода с замкнутым контуром самонастройки показаны на рисунке 8.

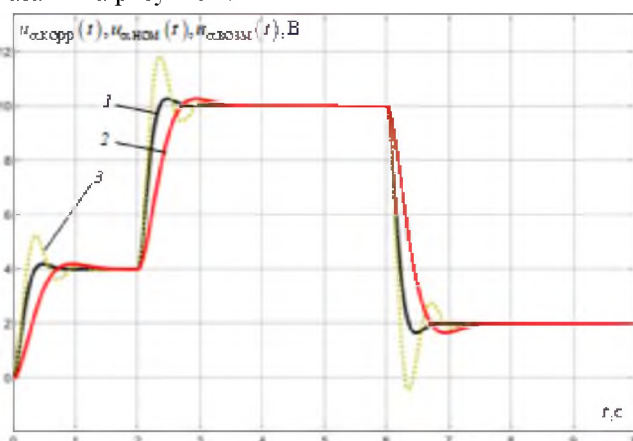


Рис. 8. Графики переходных процессов следящего электропривода: 1 – выходная координата $u_{\text{акорр}}(t)$ при замкнутом канале самонастройки; 2 – выходная координата $u_{\text{аном}}(t)$ при номинальных параметрах; 3 – выходная координата $u_{\text{авозм}}(t)$ при увеличении параметров в два раза Fig. 8. Transient processes graphs of the servo drive: 1 – output coordinate $u_{\text{акорр}}(t)$ with closed self-tuning channel; 2 – output coordinate $u_{\text{аном}}(t)$ at nominal parameters; 3 – output coordinate $u_{\text{авозм}}(t)$ when the parameters are doubled

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Из анализа приведенных зависимостей следует, что переходный процесс следящего электропривода при замкнутом канале самонастройки при заданных параметрических возмущениях (график 1 на рис. 8) характеризуется незначительным снижением перерегулирования до 4% и увеличением быстродействия на 0,4 с по сравнению с процессом в оптимизированном электроприводе (график 1). Данные отличия вызваны результирующей погрешностью, складывающейся из погрешности при вычислении оценок K' и T_M , и погрешности, возникающей при формировании канала самонастройки вследствие операций ограничения величины корректирующего коэффициента в переходных режимах и задержки такта интегрирования.

Таким образом, метод синтеза параметрически инвариантного следящего электропривода, базирующийся на формировании алгоритма самонастройки коэффициентов корректирующего устройства с вычислением оценок параметров электропривода, определяющих структуру $W_{\text{кв}}(s)$, разработанный в рамках настоящего исследования, может быть успешно применен при решении задач проектирования систем управления электроприводов в условиях параметрической неопределенности.

Выводы

В настоящей статье проведен анализ методов синтеза следящих электроприводов, функционирующих в условиях нестабильности параметров и характеристик элементов силового и информационного каналов с применением подходов теории адаптивного управления. Рассмотрен способ выбора и расчета исполнительного электродвигателя следящего электропривода на основе наиболее общего метода эквивалентного рабочего цикла, который целесообразно использовать при решении широкого класса задач проектирования следящих систем с неизвестным заранее законом изменения входного сигнала.

Сформулирован метод восстановления параметров модели синтезируемого электропривода с известной и неизменной структурой на основе интегрирования уравнений динамики исследуемой системы. Показан принципиальный недостаток данного метода, приводящий к получению несовместных систем уравнений и определен путь устранения этого недостатка за счет применения градиентного алгоритма идентификации общего коэффициента передачи электропривода K с применением инверсной модели. Реализация алгоритма идентификации K осуществляется на основе вычисления функции чувствительности по идентифицируемому параметру (метод вспомогательного оператора), однако при этом порядок инверсной модели равен порядку исходной системы n , что является преимуществом данного алгоритма. Вычисление оценки общего коэффициента передачи позволяет произвести идентификацию остальных параметров электропривода, причем порядок вычислителя также равен n . Идентификация K с помощью инверсного идентификатора и восстановление параметров за счет интегрирования дифференциальных уравнений системы производится с высокой точностью (погрешность не превышает 0,001%). Скорость идентификации определяется настроечными коэффициентами λ_1 и λ_2 , выбор которых на этапе компьютерного эксперимента позволит сформировать требуемое быстродействие процесса вычисления оценок параметров при выполнении цикла идентификации.

Цикл самонастройки, обеспечивающий выполнение условия параметрической инвариантности, требует введения некоторых ограничений и допущений. Настоящее исследование проводилось без учета внешних координатных воздействий, влияние которых успешно скомпенсировано при разработке инверсного идентификатора [28, 29]. Тем не менее, работа параметрически инвариантной системы в условиях координатных возмущений требует дополнительного изучения, что будет проведено в последующих работах. При реализации цикла самонастройки в целях устранения сингулярных возмущений необходимо организовать его разграничение с циклом идентификации, что осуществлено путем задержки тактов интегрирования, а резонансные явления следует ограничить за счет применения звеньев насыщения.

С учетом перечисленных ограничений и допущений разработанный метод синтеза параметрически инвариантных электроприводов обеспечивает сохранение требуемого качества переходных процессов (в пределах допустимых изменений показателей) в условиях изменения параметров и характеристик элементов электропривода, не увеличивает порядок системы, обладает высокими точностью и быстродействием, не требует существенных вычислительных затрат, может применяться в случаях, когда не выполняется гипотеза квазистационарности. К недостаткам метода можно отнести необходимость дополнительных мероприятий по обеспечению инвариантности к координатным возмущениям, требование линейности или линеаризации математического описания исследуемых систем при его строгой априорной определенности и неизменности,

а также относительную сложность вычислительных алгоритмов в случае исследования систем высокого порядка.

Тем не менее, указанные недостатки не представляют неразрешимой задачи, алгоритм самонастройки не требует дополнительного оборудования для практической реализации, а метод синтеза параметрически инвариантного следящего электропривода на основе эквивалентного рабочего цикла с применением процедуры восстановления параметров модели может быть использован при проектировании робастных систем управления нестационарными объектами.

Литература

1. Нартов М.В. Классификация следящих систем управления и особенности их проектирования / М.В. Нартов // Интернаука. – 2018. – № 5(39). – С. 26-27.
2. Ермоленко А.И., Коршунов А.И. Расчет цифровых следящих систем комбинированного управления с использованием предельной непрерывной модели. Ч. II. Расчет цифровой следящей системы // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 7. С. 602–609.
3. Zheng W., Luo Y., Chen Y. Pi Y. Fractional-order modeling of permanent magnet synchronous motor speed servo system. J. Vib. Control, 2016, 22, p. 2255–2280.
4. Shah P., Agashe S. Review of fractional PID controller. Mechatronics, 2016, 38, p. 29–41.
5. Елсуков В.С., Лачин В.И., Павлов В.В. Синтез систем управления со знакопеременной компенсирующей обратной связью в условиях ограниченной неопределенности // Изв. вузов. Электромеханика. 2020. Т. 63. № 5. С. 40-45.
6. Фуртат И.Б. Адаптивное управление неминимально-фазовыми нелинейными объектами // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. № 3. С. 30 – 37.
7. Furtat I., Fradkov A., Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances // Int. J. Robust and Nonlinear Control. -2014. - Vol. 24, No. 17. - P. 2774-2784.
8. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Цветкович А.М. Особенности применения теории чувствительности для анализа влияния параметрических возмущений на динамические свойства электромеханических преобразователей. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019;21(6):101-110.
9. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Козелков О.В., Дюрягин А.М. Анализ динамических характеристик вентильного двигателя мехатронной системы в условиях параметрической неопределённости методами компьютерного моделирования. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(3):158-174.
10. Awerbuch B., Kleinberg R. Online linear optimization and adaptive routing. Journal of Computer and System Sciences, 74(1): 97–114, 2008.
11. Бу Ань Хиен, Ягодкина Т.В. Синтез инвариантной системы адаптивного модального управления на базе следящей системы // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 6-1. – С. 52-57.
12. Анисимов А. А. Параметрическая оптимизация электромеханических систем с регуляторами и наблюдателями состояния // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2016. № 2. С. 21–26.
13. Земляков С.Д., Рутковский В.Ю. Алгоритм функционирования адаптивной системы с эталонной моделью, гарантирующий заданную динамическую точность управления нестационарным динамическим объектом в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. – 2009. - № 10. – С.35-44.
14. Cheng-Wei Chen, Tsu-Chin Tsao. Data-Driven Progressive and Iterative Learning Control. IFAC-PapersOnLine, 50 (1):4825–4830, 2017.
15. Hassan K Khalil. Adaptive output feedback control of nonlinear systems represented by input-output models. IEEE Transactions on Automatic Control, 41 (2): 177–188, 1996.
16. Andrea Serrani. Output regulation for over-actuated linear systems via inverse model allocation. In 2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC), pages4871–4876. IEEE, 2012.
17. Панферов, В.И. Параметрическая идентификация модели
18. Объект управления по переходной функции работающей системы автоматического регулирования / В.И. Панферов, С.В. Панферов, К.С. Халдин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 52–59.

19. Штейнберг Ш.Е. Настройка и адаптация автоматических регуляторов. Инструментальный комплект программ / Ш.Е. Штейнберг, И.Е. Залуцкий, Л.П. Сережин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2003. – № 10. – С. 43–47.
20. Khasanov Z. M., Khasanova N. V. Mathematical model and design of adaptive control system of multivariable electric drives for technological plasma arc spraying process equipment // Proc. of the Workshop on Computer Science and Information Technologies CSIT'2014, (Sheffield, England, September 17-22, 2014). Ufa: UGATU, 2014. Vol. 2. P. 209-211.
21. Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Сантьяго Мартинез Леон А., Мигель Москера Морочо Л. Адаптивное управление нелинейным объектом типа конвертоплан в условиях неопределенностей. Известия Юго-Западного государственного университета. 2020;24(3):35-50.
22. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Козелков О.В., Малайон А.С. Цифровой алгоритм контроля функционирования электромеханического преобразователя постоянного тока. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(1):126-140.
23. Цветков А.Н., Доан Н.Ш., Ярославский Д.А. Исследования по оптимизации векторного управления асинхронным двигателем с применением системы аналитического контроля. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(3):144-157.
24. Малёв Н.А., Погодицкий О.В. ИССЛЕДОВАНИЕ И СИНТЕЗ МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕХАНИЗМА ПОДЪЁМА КРАНА. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018;20(7-8):99-106.
25. Кояин Н.В., Мальцева О.П., Удуд Л.С. Оптимизация контуров регулирования систем электропривода по типовым методикам // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 120–125.
26. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Чилиева М.Р., Имамиев А.Р. Алгоритм параметрической идентификации электропривода постоянного тока с применением инверсной модели. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021;23(6):119-133.
27. Малёв Н.А. Бесписковая градиентная идентификация коэффициента передачи системы управления электропривода постоянного тока / Н.А. Малёв, О.В. Погодицкий, А.Н. Хуснутдинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 42. – С. 42–64.

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – доцент кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Nartov M.V. Classification of servo control systems and features of their design. *Internauka*. 2018;5(39):26-27.
2. Ermolenko AI, Korshunov AI. Calculation of digital servo systems of combined control using the limiting continuous model. Part II. Calculation of a digital tracking system. *Izvestiya VUZov. Instrumentation*. 2019;62(7):602-609.
3. Zheng W, Luo Y, Chen Y Pi Y. Fractional-order modeling of permanent magnet synchronous motor speed servo system. *J. Vib. Control*. 2016;22:2255–2280.
4. Shah P, Agashe S. Review of fractional PID controller. *Mechatronics*. 2016;38:29–41.
5. Elsukov VS, Lachin VI, Pavlov VV. Synthesis of Control Systems with Sign-To-Effect Compensating Feedback in Conditions of Limited Uncertainty. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika. Russian Electromechanics*, 2020;63(5):40-45.
6. Furtat IB. Adaptive control of non-minimumphase nonlinear objects. *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2013;3:30- 37.
7. Furtat I, Fradkov A, Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances. *Int. J. Robust and Nonlinear Control*. 2014;24(17):2774-2784.
8. Malev NA, Pogoditsky OV, Cvetkovich AM. Features of application of sensitivity theory for analysis of influence of parametric disturbances on dynamic properties

electromechanical converters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(6):101-110.

9. Malev NA, Pogoditsky OV, Kozelkov OV, et al. Analysis dynamic characteristics brushless motor of the mechatronic system in conditions of parametric uncertainty by computer simulation methods. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(3):158-174.

10. Awerbuch B, Kleinberg R. Online linear optimization and adaptive routing. *Journal of Computer and System Sciences*. 74(1): 97–114, 2008.

11. Wu An Hien, Yagodkina T.V. Synthesis of an invariant system of adaptive modal control based on a servo system. *Fundamental research*. 2016;6-1:52-57.

12. Anisimov A.A. Parametrical optimization of regulators and state observers in electromechanical systems. *Vestnik IGEU*. 2016;2:21–26.

13. Zemlyakov SD, Rutkovsky VYu. Algorithm for the functioning of an adaptive system with a reference model that guarantees a given dynamic accuracy of control of a non-stationary dynamic object under uncertainty. *Avtomatika i Telemekhanika*. 2009;10:35-44.

14. Cheng-Wei Chen, Tsu-Chin Tsao. Data-Driven Progressive and Iterative Learning Control. *IFAC-PapersOnLine*, 50 (1):4825–4830, 2017.

15. Hassan K Khalil. *Adaptive output feedback control of nonlinear systems represented by input-output models*. IEEE Transactions on Automatic Control. 1996;41 (2):177–188.

16. Andrea Serrani. *Output regulation for over-actuated linear systems via inverse model allocation*. In 2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC), p. 4871–4876. IEEE, 2012.

17. Panferov VI, Panferov SV, Haldin KS. Parametric Identification of the Model of Object Management by Transitional Function Working System Automatic Regulation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2019;19(3):52–59.

18. Steinberg ShE, Zalutsky IE, Seregin LP. [Setting and Adaptation of Automatic Controllers. Tool Set of Programs]. *Industrial Control Information System and Controller*. 2003;10:43-47.

19. Khasanov ZM, Khasanova NV. Mathematical model and design of adaptive control system of multivariable electric drives for technological plasma arc spraying process equipment in Proc. of the Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT'2014). 2014;2:209-211, 2014.

20. Yatsun SF, Emelyanova OV, Santiago Martinez Leon A., Miguel Mosquera Moroch L. *Adaptive Control of a Nonlinear Convertiplane under Conditions of Uncertainty*. Proceedings of the Southwest State University. 2020;24(3):35-50.

21. Malev NA, Pogoditsky OV, Kozelkov OV. Digital algorithm monitoring functioning of electromechanical dc converter. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(1):126-140.

22. Tsvetkov AN, Doan NS, Yaroslavsky DA. Research on optimization of vector control of an asynchronous motor using the analytical control system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(3):144-157.

23. Malev NA, Pogoditsky OV. RESEARCH AND SYNTHESIS OF THE MODAL REGULATOR OF THE TWO-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF THE CRANE LIFTING MECHANISM. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(7-8):99-106.

24. Koyain N.V., Maltseva O.P., Udut L.S. Optimization of control loops of electric drive systems according to standard methods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2005;308(7):120-125.

25. Malev NA, Pogoditsky OV, Chilyaeva MR. Algorithm for parametric identification of the dc electric drive using the inverse model. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(6):119-133.

26. Malev NA, Pogoditsky OV, Imamiev AR. Search-free gradient identification of the coefficient transmission of control system dc electric drive. Perm national research polytechnic university bulletin. *Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2022;42:42-64.

Authors of the publication

Nikolai A. Malev – docent, Department «Instrument Making and Mechatronics», Kazan State Power Engineering University.

Шифр научной специальности:

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

2.4.5 Энергетические системы и комплексы (технические науки)

Получено

06.02.2023г.

Отредактировано

20.02.2023г.

Принято

28.02.2023г.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Виноградов¹ А.В., Лансберг¹ А.А., Волчков² Ю.Д., Виноградова¹ А.В.

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ

²Орловский государственный аграрный университет

winaleksandr@gmail.com

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Надёжность электроснабжения потребителей зависит от надёжности всех элементов системы электроснабжения, в том числе устройств релейной защиты и автоматики (РЗА). Знание современных значений показателей надёжности различных устройств, позволяет учитывать их при проектировании РЗА, выбирая более надёжные устройства, выявлять недостатки средств РЗА и выполнять работу по устранению. **ЦЕЛЬ.** В связи с недостаточностью открытых данных о современных значениях показателей надёжности устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) электрических сетей 10-110 кВ, актуальным является вопрос их определения на примере энергосистем различных регионов. **МЕТОДЫ.** Авторами приведены и проанализированы официальные статистические данные по количеству аварийных отказов, ложных и правильных срабатываний устройств релейной защиты и автоматики в электросетевой организации - филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» за 2013-2021 годы. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В ходе исследования были определены численные значения следующих показателей надёжности устройств релейной защиты и автоматики: поток отказов и частота излишних срабатываний. Устройства релейной защиты и автоматики, для которых были определены показатели надёжности, применяются для реализации дуговой защиты, максимальной токовой защиты, автоматического повторного включения, дифференциальной защиты шин и трансформатора, поперечной направленной дифференциальной защиты, газовой защиты трансформатора, дифференциально-фазной защиты. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Установлены значения потока отказов для разных типов реле и микропроцессорных устройств РЗА, например, для электромеханического реле типа ДЗТ-11, используемого для реализации дифференциальной защиты трансформаторов с высшим напряжением 110 кВ поток отказов составляет 0,2 год⁻¹/100 шт., а частота излишних срабатываний - 22,22 год⁻¹/100 шт. Сделаны выводы, о необходимости мероприятий по регулированию уставок и техническому обслуживанию устройств различных типов.

Ключевые слова: релейная защита и автоматика; реле; устройство; показатели надёжности; поток отказов; частота излишних срабатываний; максимальная токовая защита; дифференциальная защита.

Для цитирования: Виноградов А.В., Лансберг А.А., Волчков Ю.Д., Виноградова А.В. Определение современных показателей надёжности устройств релейной защиты и автоматики // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т. 25. №2. С. 58-70. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-58-70.

DETERMINATION OF MODERN RELIABILITY INDICATORS OF RELAY PROTECTION AND AUTOMATION DEVICES

Vinogradov¹ A.V., Lansberg¹ A.A., Volchikov² Yu.D., Vinogradova¹ A.V.

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM

²Orel State Agrarian University

winaleksandr@gmail.com

Abstract: **RELEVANCE.** The reliability of power supply to consumers depends on the reliability of all elements of the power supply system, including relay protection and automation devices

(RZiA). Knowing the current values of the reliability indicators of various devices makes it possible to take them into account when designing RPA, choosing more reliable devices, identifying shortcomings in RPA and performing work to eliminate them.

THE PURPOSE. Due to the lack of open data on the current values of reliability indicators of relay protection and automation devices (RPA) of electric networks of 10-110 kV, the question of their determination on the example of power systems of various regions is relevant. **METHODS.** The authors present and analyze official statistical data on the number of emergency failures, false and correct actuations of relay protection and automation devices in the electric grid organization - branch of PJSC «Rosseti Center»-«Orelenergo» for 2013-2021. **RESULTS.** In the course of the study, numerical values of the following reliability indicators of relay protection and automation devices were determined: the failure rate and the frequency of excessive triggering. Relay protection and automation devices, for which reliability indicators have been determined, are used to implement arc protection, maximum current protection, automatic re-activation, differential protection of buses and transformer, transverse directional differential protection, gas protection of transformer, differential-phase protection. **CONCLUSION.** The values of the failure flow for different types of relays and microprocessor devices of the RPA are established, for example, for an electromechanical relay of the DZT-11 type used to implement differential protection of transformers with a higher voltage of 110 kV, the failure flow is 0,2 year⁻¹/100 pcs., and the frequency of excessive triggering is 22,22 year⁻¹/100 pcs. Conclusions are drawn about the need for measures to regulate the settings and maintenance of devices of various types.

Keywords: relay protection and automation; relay; device; reliability indicators; failure rate; frequency of excessive triggering; maximum current protection; differential protection.

For citation: Vinogradov AV, Lansberg AA, Volchkov YuD, Vinogradova AV. Determination of modern reliability indicators of relay protection and automation devices. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(2): 58-70. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-58-70.

Введение (Introduction)

В настоящее время работы многих ученых направлены на повышение эффективности работы устройств релейной защиты и автоматики с целью повышения надежности их функционирования и снижения вероятности ложного срабатывания. Например, в работах [1, 2] отмечено, что современные микропроцессорные (МП) терминалы релейной защиты и автоматики (РЗиА) характеризуются меньшей надежностью по сравнению с другими устройствами РЗиА, выполненными на электромеханической (ЭМ) и статической (СТ) элементных базах. Но, в свою очередь, цифровые терминалы РЗиА обладают рядом преимуществ, например, наличие функции мониторинга состояния энергообъекта и самодиагностика, многофункциональность в реализации нескольких видов защит, возможность передачи данных с энергообъекта.

В работах [3, 4, 5] отмечено, что необходимо проработать вопросы создания новых методик выбора уставок срабатывания устройств РЗиА в условиях активного развития интеллектуальных сетей с распределённой генерацией. Методики должны учитывать конфигурацию таких электрических сетей и особенности их работы. Отдельно авторами ставится вопрос о защите современных цифровых терминалов РЗиА от кибернетических атак.

В работе [6] предлагается использовать терминалы микропроцессорной защиты, работающие по адаптивному принципу, который предполагает изменение уставок терминалов при изменении режимов работы солнечных панелей, биогазовых установок, ветряных турбин, что будет сопровождаться изменением тока, протекающего по элементам микросети. Другим направлением защиты микросетей, предложенным в работе [7], является использование цифровых терминалов релейной защиты, реализующих функции ряда защит: максимальной токовой защиты (МТЗ), дистанционной защиты, дифференциальной защиты, защит от лавин частоты и напряжения.

В работе [8] с использованием программного обеспечения *Matlab Simulink* исследуется работоспособность реле максимальной токовой защиты при его использовании в радиальной, кольцевой и сложнозамкнутой электрических сетях с целью минимизации его отказов и ложных срабатываний. Подобное исследование произведено путем физического моделирования в работе [9] на примере электромеханического реле серии РТ-80.

Вопросам повышения надежности работы устройств РЗиА также посвящено множество отечественных работ. Так, в [10] установлено, что пренебрежение ёмкостными

токами при выборе типов и параметров срабатывания логической защиты шин приводит к их ложной работе по причине несовершенных алгоритмов блокировки защит вводов секций шин, не учитывающих протекание ёмкостных токов через межсекционные связи при однофазном замыкании на землю.

В работе [11] для повышения надежности функционирования защиты от замыканий на землю в сети с комбинированным заземлением нейтрали, использованным на электростанции собственных нужд ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» (ГТУ-ТЭС-200, установленная мощность 200 МВт, заводская распределительная сеть 35 кВ протяженностью 90,33 км, с ёмкостным током замыкания 441,5 А), на отходящих присоединениях предложено использовать трансформаторы тока нулевой последовательности в связи с минимальными токами небаланса и их высокой чувствительностью, что позволит уменьшить количество ложных срабатываний.

В свою очередь, для защиты линий 110-220 кВ связи электростанций с энергосистемой предлагается использование в качестве основной - адаптивной релейной защиты [12, 13]. Данное решение позволит сохранить устойчивость работы синхронных генераторов электростанций и надежность функционирования токовой направленной защиты параллельных линий за счет простоты исполнения.

При этом в большинстве научных работ не представлены данные, характеризующие частоту отказов, случаи ложной работы и другие показатели надежности самих устройств РЗА.

Приведённые в литературных источниках показатели надежности характеризуют, как правило, устройства РЗА объектов электроэнергетики напряжением 35 кВ и выше. Например, приводятся сведения, что в электросетевой компании ПАО «Россети» устройства релейной защиты срабатывают правильно в 99,48-99,55% аварийных отключениях объектов электроэнергетики [14]. В работе [15] даны сведения о показателях надежности некоторых устройств релейной защиты и автоматики, представленные в таблице 1.

Недостатком данных о показателях надежности устройств РЗА, представленных в таблице 1, является то, что они характеризуют общие показатели без разбивки их по классам напряжения. Для показателей надежности газовой защиты трансформаторов и продольной дифференциальной защиты генераторов не указаны конкретные типы устройств релейной защиты и автоматики, с помощью которых организованы исполнительные органы данных защит.

Таблица 1
Table 1

Показатели надежности устройств релейной защиты и автоматики
Reliability indicators of relay protection and automation devices

Тип устройства	Поток отказов, $\omega_{отк}, \text{год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$	Вероятность излишних срабатываний на требования вне зоны $\rho_{изл}, \text{о.е.}$	Частота ложных срабатываний, $\omega_{лож}, \text{год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$	Вероятность отказа на требование ρ , отказ/требование
Дифференциально-фазная высокочастотная защита типа ДФЗ-2	1	0,2	1,9	0,24
Фильтровая высокочастотная направленная защита типов ПЗ-162, ПЗ-164, ПЗ-164А	4	0,2	1,8	0,78
Дистанционные защиты типов ПЗ-156, ПЗ-157, ПЗ-158	0,68	0,3	2,7	0,59
Дистанционные защиты с высокочастотной блокировкой типов ПЗ-156, ПЗ-157, ПЗ-158	0,77	0,1	0,73	0,57
Дистанционные защиты без высокочастотной блокировки ПЗ-151, ПЗ-152, ПЗ-153	0,7	0,02	0,18	0,8

Продолжение таблицы 1

Дифференциальная защита шин 110 кВ и выше	0,42	0,1	1,1	2,9
Газовая защита трансформатора с действием на отключение	0,45	0	0,1	0,3
Продольная дифференциальная защита генераторов	0,05	0,1	0,07	0
Автоматы повторного включения линий 110...330 кВ	-	-	-	0,72
Автоматы подстанций	0,7	-	12	-
Автоматы частотной разгрузки	0,17	-	0,25	0,16
Автоматическое устройство разгрузки при отключении участков линий электропередачи	-	-	-	0,03

**Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.*

Показатель потока отказов, представленный в таблице 1, согласно СТО 34.01-4.1-008-2018 «Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики. Методические указания по расчёту надёжности. Стандарт организации ПАО «Россети». Дата введения: 28.04.2018», характеризует частоту отсутствия срабатывания устройства РЗА в соответствии с заложенной логикой действия при наличии требования срабатывания. При этом частота ложных срабатываний устройства РЗА согласно СТО 34.01-4.1-008-2018 характеризует частоту срабатываний устройства РЗА, исходя из заложенной в нём логики, при отсутствии требования срабатывания для данного устройства. Следует отметить, что ложные срабатывания устройства РЗА в основном обусловлены некорректно выставленными уставками.

Таким образом, в настоящее время является актуальным вопрос определения показателей надёжности устройств РЗА электрических сетей с разбивкой по классам напряжения и типам устройств.

Цель исследования заключается в определении современных показателей надёжности устройств релейной защиты и автоматики 10-110 кВ.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для определения современных показателей надёжности устройств релейной защиты и автоматики были использованы статистические данные срабатываний дуговой защиты, максимальной токовой защиты (МТЗ), автоматического повторного включения (АПВ), дифференциальной защиты шин (ДЗШ), поперечной направленной дифференциальной защиты (ПНДЗ), дифференциальной защиты трансформаторов (ДЗТ), газовой защиты трансформаторов, дифференциально-фазной защиты (ДФЗ), других устройств РЗА, которые предназначены для защиты силовых трансформаторов (СТ), линий электропередачи (ЛЭП) и секций шин (СШ) в энергосистеме Орловской области за 2013-2021 годы.

Устройства РЗА, используемые в филиале «Орелэнерго» выполнены на разных элементных базах: электромеханической (ЭМ), статической (СТ), микропроцессорной (МП). Для реализации газовой защиты трансформаторов используются струйные и поплавковые (ПП) реле.

В работе [16] отмечено, что с 2013 по 2021 годы ежегодно было зафиксировано от 1734 до 4186 срабатываний устройств релейной защиты, среди которых правильными были от 1720 до 4180 срабатываний, при этом число неправильных срабатываний с 2013 по 2021 годы было от 2 до 14. Таким образом, доля успешных срабатываний устройств релейной защиты в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» составляет 99,19%-99,93%, а неуспешных 0,07%-0,81%. Сведения о неправильных срабатываниях устройств релейной защиты и автоматики в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» за 2013-2021 годы представлены на рисунке 1. Всего за 2013-2021 годы было зафиксировано 37 ложных срабатываний и 26 аварийных отказов устройств РЗА.

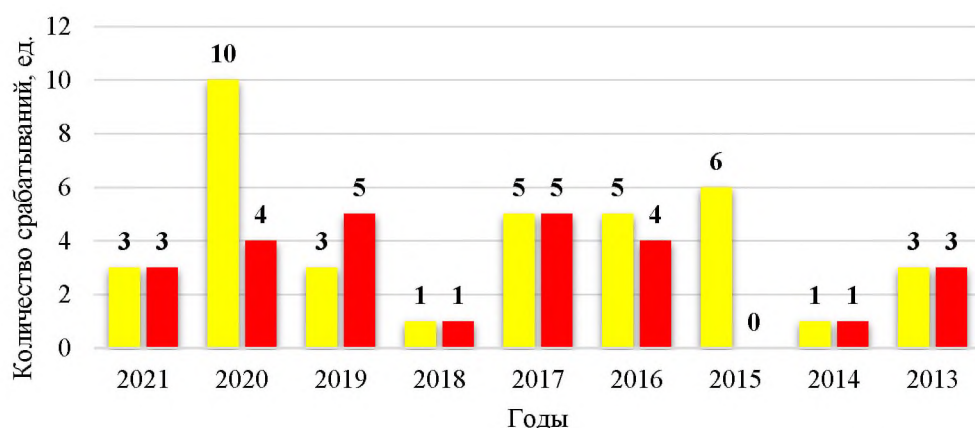


Рис. 1. Сведения о количестве неправильных срабатываний устройств релейной защиты в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» за 2013-2021 год

Fig. 1. Information on the number of incorrect operation of relay protection devices in the branch of PJSC «Rosseti Center»-«Orelenenergo» for 2013-2021

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Для примера, в таблице 2 представлены сведения о срабатываниях устройств дуговой защиты секций шин 10 кВ, выполненных на базе Орион-ДЗ. За анализируемый период времени произошло 8 срабатываний устройств дуговой защиты на базе микропроцессорного оптоволоконного устройства Орион-ДЗ с учетом того, что для защиты секций шин 10 кВ подстанций (ПС) с высшим напряжением 35-110 кВ в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» их используется 76 единиц. Из 8 срабатываний 25% были неуспешными, одно срабатывание (на ПС 110/35/10 кВ «Красная Заря» в 2013 году) было ложным. Также был зафиксирован один отказ (на ПС 110/35/10 кВ «Богородицкая») также в 2013 году.

Представленные в таблице 2 данные позволяют определить показатели надежности микропроцессорного оптоволоконного устройства Орион-ДЗ в условиях энергосистемы Орловской области.

Таблица 2

Table 2

Сведения о срабатываниях дуговой защиты секций шин 10 кВ, выполненных на базе устройства Орион-ДЗ, в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» за 2013-2021 годы

Information on the operation of arc protection sections of 10 kV tires, made on the basis of the device Orion-RS, in the branch of PJSC «Russian Grids Center»-«Orelenenergo» for 2013-2021

№	Объект электроэнергетики	Оценка работы устройства
2020 год		
1	ПС 110/35/10 кВ «Шаблыкино»	Правильно
2019 год		
2	ПС 110/35/10 кВ «Болхов»	Правильно
2016 год		
3	ПС 110/35/10 кВ «Шаблыкино»	Правильно
4	ПС 110/35/10 кВ «Знаменская»	Правильно
2013 год		
5	ПС 110/35/10 кВ «Красная Заря»	Неправильно, ложно
6	ПС 110/35/10 кВ «Богородицкая»	Неправильно, отказ
7	ПС 110/10/6 кВ «Центральная»	Правильно
8	ПС 110/35/10 кВ «Малоархангельская»	Правильно

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Показатель частоты отказов, согласно СТО 34.01-4.1-008-2018, определяется по формуле (1):

$$\omega_{\text{отк}} = \frac{n_{\text{отк.ср.}} \cdot 100}{n_{\text{ед.}}}, (\text{год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}) \quad (1)$$

где $n_{\text{отк.ср.}}$ – среднеарифметическое значение количества отказов устройства РЗА за 2013-2021 годы в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», ед.;

$n_{\text{ед.}}$ – количество устройств релейной защиты и автоматики данного типа, находящихся в эксплуатации в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», ед.

Показатель частоты ложных срабатываний, согласно СТО 34.01-4.1-008-2018, определяется по формуле (2):

$$\omega_{\text{лож}} = \frac{n_{\text{лож.ср.}} \cdot 100}{n_{\text{прав.сраб.ср.}}}, (\text{год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}) \quad (2)$$

где $n_{\text{лож.ср.}}$ – среднеарифметическое значение количества ложных срабатываний устройства РЗА за 2013-2021 годы в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», ед.;

$n_{\text{прав.сраб.ср.}}$ – среднеарифметическое количество правильных срабатываний устройства релейной защиты и автоматики за 2013-2021 годы в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», ед.

Для определения показателей надежности других устройств релейной защиты в таблице 3 представлены результаты анализа срабатываний устройств РЗА за 2013-2021 годы в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго». При этом сведения об общем количестве устройств РЗА разных типов в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» представлены в источнике [17].

Таким образом, исходя из формул (1), (2) для определения потока отказов устройств релейной защиты необходимо знать количество отказов определенного устройства за время эксплуатации и общее количество устройств, находящихся в эксплуатации в электросетевой компании. Для определения частоты ложных срабатываний необходимо знать количество ложных и правильных срабатываний устройства за время эксплуатации.

Таблица 3

Table 3

Сведения о количестве устройств релейной в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» и их срабатываниях за 2013-2021 годы

Information on the number of relay devices in the branch of PJSC «Russian Grids Center»- «Orelenergo» and their works for 2013-2021

Тип устройства	Элементная база	Защищаемое присоединение	Всего срабатываний	Всего отказов	Всего ложных срабатываний	Всего правильных срабатываний	Всего в эксплуатации в филиале
Дуговая защита							
Орион-ДЗ	МП	СШ 10 кВ	8	1	1	6	76
Максимальная токовая защита							
РС-80М2-20	СТ	СТ 110 кВ	6	0	4	2	3
РТ-40	ЭМ		11	2	1	8	63
РТ-85	ЭМ		4286	1	0	4285	162
РС-80М2-31С	СТ		584	1	0	583	146
РС80М2-31	СТ		974	2	0	972	6
РТВ	ЭМ		2715	2	0	2713	115
РСТМ-80	СТ		10	1	0	9	1
Сириус-2МЛ	МП		913	1	0	912	162
РТ-40	ЭМ	СВ 10 кВ	1	1	0	0	146
Сириус-2С	МП		3	0	1	2	11
Sepam B07	МП	СВ 110 кВ	2	0	1	1	1
Автоматическое повторной включение							
РПВ-258	ЭМ	ЛЭП 10 кВ	3283	1	0	3282	54
ШЭ 2607 011	МП	ЛЭП 110 кВ	23	2	1	20	6
РПВ-01	СТ		13	2	0	11	9

Продолжение таблицы 3

РПВ-258	ЭМ		36	3	0	33	9
РПВ-58	ЭМ		90	1	0	89	2
РПВ-258	ЭМ	СВ 110 кВ	14	0	1	13	3
Дифференциальная защита шин							
РНТ-567	ЭМ	СП 110 кВ	2	0	1	1	2
Поперечная направленная дифференциальная защита							
КЗ-7	ЭМ	ЛЭП 110 кВ	56	0	1	55	2
Дифференциальная защита трансформатора							
ДЗТ-11	ЭМ	СТ 110 кВ	23	1	4	18	55
Газовая защита трансформатора							
BF-80/Q	ПП	СТ 110 кВ	4	0	3	1	53
Дифференциально-фазная защита							
ДФЗ-201	ЭМ	ЛЭП 110 кВ	24	2	3	19	8
ШЭ 2607 087	МП		35	0	2	33	4

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Следует отметить, что в таблице 2 не представлены отказы и ложные срабатывания некоторых устройств РЗА, которые включены в общую статистику неправильной работы на рисунке 1, что обусловлено невозможностью определения их показателей надежности ввиду недостаточного количества статистических данных об их правильных срабатываниях.

В частности, не отмечено правильных срабатываний МТЗ СТ 110 кВ на базе реле РС80М2-31С, в то время как ложные срабатывания данной защиты наблюдались на подстанции 110/10 кВ «Восточная» в 2020 году. Это же относится и к терминалу Seram S03 на подстанции ПС 110/10 кВ «Северная», ложному срабатыванию токовой защиты нулевой последовательности на базе терминала Бреслер ТЛ 2606.101-1 на ВЛ 110 кВ «Нарышкинская – Богородицкая» в 2015 году. Кроме того, отмечены следующие ложные срабатывания:

- дифференциальной защиты трансформатора на базе терминала Бреслер ТЛ 2606.101-1 на подстанции 110/35/10 кВ «Нарышкинская» в 2017 году;
- терминалов Сириус-Т на подстанции ПС 35/6 кВ «Пушкарская» в 2016 году и на подстанции 110/6 кВ «ГМ» в 2015 году;
- газовых защит трансформатора на подстанции 35/10 кВ «Гостомль» на базе реле поплавкового реле BF-50/10 в 2020 году и на базе поплавкового реле ПГ-22 на подстанции 110/35/10 кВ «Болхов» в 2015 году;
- газовой защиты РПН СТ 110 кВ на подстанциях 110/10/6 кВ «Юго-Восточная» и 110/6 кВ «Заводская» на базе реле СТЗ Вколаров в 2017 и 2016 годах;
- УРОВ вводного выключателя РУ 6 кВ на подстанции 110/6 кВ «Пластмасс» в 2020 году на базе реле РТ-40/Р;
- направленной высокочастотной защиты ВЛ 110 кВ «Орловская Районная-Северная I цепь» на базе терминала ШЭ 2607 031 в 2019 году.

Следует отметить, что в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» эксплуатируется большая номенклатура устройств релейной защиты, сведения об аварийных отказах которых отсутствуют. Поэтому определить показатели их надежности невозможно, требуются дополнительные статистические данные.

Результаты (Results)

Согласно формуле (1) частота отказов микропроцессорного оптоволоконного устройства дуговой защиты Орион-ДЗ составляет:

$$\omega_{\text{отк.Орион-ДЗ}} = \frac{N_{\text{отк.ср.Орион-ДЗ}} \cdot 100}{N_{\text{ед.Орион-ДЗ}}} = 0,15 \text{ (год}^{-1}\text{/100·шт.)}$$

При этом частота ложных срабатываний микропроцессорного оптоволоконного устройства дуговой защиты Орион-ДЗ согласно формуле (2) равна:

$$\omega_{\text{лож.Орион-ДЗ}} = \frac{N_{\text{лож.ср.Орион-ДЗ}} \cdot 100}{N_{\text{прав.сраб.ср.Орион-ДЗ}}} = 16,57 \text{ (год}^{-1}\text{/100·шт.)}$$

Результаты расчетов показателей надежности устройств РЗА по статистическим данным филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» представлены в таблице 4.

Таблица 4
Table 4

Показатели надежности устройств релейной защиты и автоматики на основе статистических данных филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго».
Indicators of reliability of relay protection devices and automation on the basis of statistical data of the branch of PJSC «Russian Grids Center»-«Orelenenergo».

Тип устройства	Элементная база	Защищаемое присоединение	Поток отказов, $\omega_{\text{отк.}}$, год ⁻¹ /100·шт.	Частота излишних (ложных) срабатываний, $\omega_{\text{изл.}}$, год ⁻¹ /100·шт.
Дуговая защита				
Орион-ДЗ	МП	Секция шин 10 кВ	0,15	16,57
Максимальная токовая защита				
РС-80М2-20	СТ	СТ 110 кВ	-	200
РТ-40	ЭМ		0,35	12,5
РТ-85	ЭМ	ЛЭП 10 кВ	0,07	-
РС-80М2-31С	СТ		0,08	-
РС80М2-31	СТ		3,7	-
РТВ	ЭМ		0,19	-
РСТМ-80	СТ		11,11	-
Сириус-2МЛ	МП		0,07	-
РТ-40	ЭМ	СВ 10 кВ	0,08	-
Сириус-2С	МП		-	50
Sepam B07	МП	СВ 110 кВ	-	100
Автоматическое повторное включение				
РПВ-258	ЭМ	ЛЭП 10 кВ	0,21	-
ШЭ 2607 011	МП	ЛЭП 110 кВ	3,7	5
РПВ-01	СТ		2,47	-
РПВ-258	ЭМ		3,7	-
РПВ-58	ЭМ		5,56	-
РПВ-258	ЭМ	СВ 110 кВ	7,68	-
Дифференциальная защита шин				
РНТ-567	ЭМ	СШ 110 кВ	-	100
Поперечная направленная дифференциальная защита				
КЗ-7	ЭМ	ЛЭП 110 кВ	-	1,82
Дифференциальная защита трансформатора				
ДЗТ-11	ЭМ	СТ 110 кВ	0,2	22,22
Газовая защита трансформатора				
BF-80/Q	ПП	СТ 110 кВ	-	300
Дифференциально-фазная защита				
ДФЗ-201	ЭМ	ЛЭП 110 кВ	2,78	15,79
ШЭ 2607 087	МП		-	6,06

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Обсуждение (Discussions)

Результаты расчетов, приведённые в таблице 4 показывают следующее:

- поток отказов микропроцессорного оптоволоконного устройства дуговой защиты Орион-ДЗ (0,15 год⁻¹/100·шт.) значительно ниже частоты ложных срабатываний (16,57 год⁻¹/100·шт.) Высокий показатель частоты ложных срабатываний обусловлен тем, что за 9 лет наблюдений работоспособности терминалов было небольшим количество срабатываний (8 раз), при этом одно срабатывание было ложным;

- электромеханические реле серии РТ-40, используемые в максимальной токовой защите силовых трансформаторов с высшим напряжением 110 кВ, показали более высокую эксплуатационную надежность, чем статические реле серии РС-80М2-20. Частота ложных срабатываний реле РТ-40 (12,5 год⁻¹/100·шт.) в 16 раз меньше частоты ложных срабатываний реле РС-80М2-20. При этом реле РТ-40 характеризуется невысоким

показателем потока отказов со значением $0,35 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$, что обуславливает целесообразность их дальнейшей эксплуатации для реализации МТЗ СТ 110 кВ;

- в реализации максимальной токовой защиты ЛЭП 10 кВ наибольшую эксплуатационную надежность показали электромеханические реле серии РТ-85 и микропроцессорные терминалы типа Сириус-2МЛ с одинаковыми значениями потока отказов ($0,07 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$), а также статические реле серии РС-80М2-31С со значением потока отказов $0,08 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ и электромеханические реле серии РТВ со значением потока отказов $0,19 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ При этом за 9 лет в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» было зафиксировано 4286, 584 и 913 срабатываний реле РТ-85, РС-80М2-31С и терминалов Сириус-2МЛ соответственно, из которых для каждого устройства было зафиксировано только по одному отказу. Реле РТВ срабатывали 2715 раз, было зафиксировано 2 отказа. Следует отметить, что ложных срабатываний перечисленных устройств РЗА зафиксировано не было, что характеризует правильность выставленных на них персоналом электросетевой компании уставок. В филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» реле РТ-85, РС-80М2-31С, РТВ и терминалы Сириус-2МЛ представлены в количестве 162, 146, 115 и 162 единиц, соответственно. Наименьшую эксплуатационную надежность при реализации максимальной токовой защиты ЛЭП 10 кВ показали статические реле РС80М2-31 и РСТМ-80 со значениями потока отказов, соответственно, $3,7 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ и $11,11 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$;

- электромеханические реле серии РТ-40 также характеризуются высокой надежностью при их функционировании в качестве исполнительного органа максимальной токовой защиты секционных выключателей 10 кВ. Так, среди 146 реле в электросетевой компании за 9 лет эксплуатации отказ был зафиксирован один раз, что обуславливает значение потока отказов $0,08 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ При этом микропроцессорные терминалы Сириус-2С и Seram B07, используемые для реализации максимальной токовой защиты секционных выключателей 10 кВ и 110 кВ, характеризуются высокой частотой ложных срабатываний со значениями $50 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ и $100 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ Этот результат расчёта обусловлен недостаточностью статистических данных, (небольшое количество устройств, находящихся в эксплуатации, соответственно, 11 и 1 единица, а также малое количество срабатываний за 9 лет: 3 и 2 раза);

- электромеханические реле серии РПВ-258, используемые для реализации автоматического повторного включения ЛЭП 10 кВ, характеризуются высокой эксплуатационной надежностью со значением потока отказов $0,21 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ Среди 3283 срабатываний был зафиксирован 1 отказ при общем количестве устройств в эксплуатации – 54 единицы;

- среди рассчитанных показателей надежности устройств РЗА, используемых для реализации автоматического повторного включения ЛЭП 110 кВ наибольшей эксплуатационную надежность характеризуются статические реле однократного включения серии РПВ-01 со значением потока отказов $2,47 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$, а наименьшей – электромеханические реле серии РПВ-58 со значением $5,56 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ Микропроцессорные терминалы ШЭ 2607 011 характеризуется значениями потока отказов и частотой излишних срабатываний $3,7 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ и $5 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$, соответственно. При этом электромеханические реле РПВ-258, используемые для АПВ секционных выключателей 10 кВ, характеризуются значением потока отказов $7,68 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$;

- электромеханические реле РНТ-567, используемые для реализации дифференциальной защиты шин 110 кВ характеризуются частотой ложных срабатываний $100 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$, что, в первую очередь, может быть обусловлено небольшим объемом статистических данных об их срабатываниях. За 9 анализируемых лет эксплуатации в электросетевой компании было зафиксировано всего 2 срабатывания защиты с использованием данных устройств;

- устройства КЗ-7, используемые для поперечной направленной дифференциальной защиты ЛЭП 110 кВ, характеризуются частотой ложных срабатываний $1,82 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ и высокой надежностью. Они находятся в эксплуатации в филиале в количестве 2 единиц, при этом из 56 их срабатываний за 9 лет правильными были 55;

- электромеханические дифференциальные реле с торможением серии ДЗТ-11, представленные в филиале в количестве 55 единиц, характеризуются высокой надежностью и значением потока отказов $0,2 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ При этом частота ложных срабатываний реле ДЗТ-11 – $22,22 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$, что обуславливает необходимость проведения организационных мероприятий со стороны специалистов электросетевой компании по корректировке их уставок. Так, за 9 лет 4 из 23 срабатываний реле ДЗТ-11 были ложными. Также необходимо усилить контроль технического состояния поплавковых газовых реле

BF-80/Q, используемых для реализации газовой защиты трансформаторов 110 кВ, частота ложных срабатываний которых составляет $300 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$. Они представлены в количестве 53 единиц, при этом за 9 лет эксплуатации было зафиксировано 4 срабатывания, среди которых 3 являлись ложными;

- электромеханические панели дифференциально-фазной защиты типа ДФЗ-201, используемые для защиты ЛЭП 110 кВ, характеризуются потоком отказов $2,78 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ и частотой ложных срабатываний $15,79 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$, а микропроцессорные терминалы ШЭ 2607 087 – частотой ложных срабатываний $6,06 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$. Электромеханические панели ДФЗ-201 и терминалы ШЭ 2607 087 представлены в количестве 8 и 4 единиц, при этом за рассматриваемый промежуток в 9 лет было зафиксировано 24 и 35 их срабатываний, соответственно.

Заключение (Conclusions)

В работе был произведен расчет современных показателей надежности устройств релейной защиты и автоматики на основе статистических данных СРЗАиМ о срабатываниях устройств РЗА в филиале ПАО «Россети Центр»–«Орелэнерго» за 2013-2021. Исходя из результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1) Наилучшие показатели надёжности показывают электромеханические реле РТ-40, использующиеся в максимальной токовой защите силовых трансформаторов с высшим напряжением 110 кВ и секционных выключателей 10 кВ, поток их отказов не превысил, соответственно, $0,35 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ и $0,08 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$. Также высокими показателями надёжности характеризуются реле РТ-85, РС-80М2-31С, РТВ и Сириус-2МЛ со значением потока отказов $0,07 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$, $0,08 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ и $0,19 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$. Невысокое значение потока отказа имеют электромеханические реле РПВ-258 и статические реле РПВ-01, использующиеся для реализации автоматического повторного включения ЛЭП 10 кВ и ЛЭП 110 кВ, со значениями потока отказов $0,21 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ и $2,47 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$. Устройство Орион-ДЗ, использующееся в реализации дуговой защиты шин 10 кВ, имеет поток отказов $0,15 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$, а электромеханическое реле ДЗТ-11, применяющееся в дифференциальной защите силовых трансформаторов 110 кВ, - $0,2 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$.

2) Наименее надёжными являются электромеханические реле РС-80М2-20, использующие в МТЗ СТ 110 кВ со значением частоты излишних срабатываний $200 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$, а также статические реле РС80М2-31 и РСТМ-80, использующиеся в максимальной токовой защите ЛЭП 10 кВ со значениями потока отказов $3,7 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ и $11,11 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$. Микропроцессорные терминалы Сириус-2С и Sepam B07, применяющиеся в максимальной токовой защите секционных выключателей 10 и 110 кВ, характеризуются высокой частотой излишних срабатываний со значениями $50 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ и $100 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$. Высокие значения частоты излишних срабатываний имеют, использующиеся в дифференциальной защите шин реле РНТ-567 и газовой защите трансформатора реле BF-80/Q, со значениями потока отказов $100 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ и $300 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$. Устройства ДФЗ-201 и ШЭ 2607 087, использующиеся в дифференциально-фазной защите ЛЭП 110 кВ, характеризуются высокой частотой излишних срабатываний со значениями $15,79 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$ и $6,06 \text{ год}^{-1}/100 \cdot \text{шт.}$.

3) Ввиду небольших объёмов выборки при оценке надёжности некоторых типов устройств, полученные результаты по оценке их надёжности требуют подтверждения в ходе дальнейших исследований.

4) Результаты данного исследования могут использоваться персоналом электросетевых компаний для планирования проведения мероприятий по техперевооружению и реконструкции подстанций, а также персоналом проектных организаций при разработке проектной документации по автоматизации подстанций с высшим напряжением 35-110 кВ, а также научно-педагогическими работниками и студентами при выполнении научных, учебных работ.

Литература

1. Abdelmoumene Abdelkader, Bentarzi Hamid. A review on protective relays' developments and trends // Journal of Energy in Southern Africa. 25. 2014. 10.17159/2413-3051/2014/v25i2a2674.
2. Balakrishna P., Kanabar Mital, Muthukrishnan, Vijaysarathi. Power system asset management using advanced protection relays // Conference: 2017 7th International Conference on Power Systems (ICPS). 2017. pp. 836-841. 10.1109/ICPES.2017.8387405.

3. Sahebkar Farkhani Jalal, Zareein Mohammad, Najafi Arsalan, Melicio Rui, Rodrigues Eduardo. The Power System and Microgrid Protection-A Review // Applied Sciences. 10. 1-30. 2020. 10.3390/app10228271.
4. Rajalwal Nilesh, Ghosh Debomita. Recent trends in integrity protection of power system: A literature review // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2020. 10.1002/2050-7038.12523.
5. Bentarzi Hamid. Fault Tree-Based Root Cause Analysis Used to Study Mal-Operation of a Protective Relay in a Smart Grid // In book: Research Anthology on Smart Grid and Microgrid Development. 2022. pp. 348-367. 10.4018/978-1-6684-3666-0.ch016.
6. Alimkhan Aisultan, Abukhan Aishabibi. Overview of Relay Coordination using Adaptive Protection Scheme for the interconnected distribution system. 2019. 10.13140/RG.2.2.16072.98562.
7. Zhang Zhaoyun, Chen Wei, Zhang Zhutian. Research on the relay protection system of micro-grid // Tehnicki Vjesnik. 22. (2015). 51-59. 10.17559/TV-20150210221236.
8. Idris Rasyidah, Mohamed Siti. Coordination of Overcurrent Relay In Distribution System // ElektriKA - Journal of Electrical Engineering. 21. 50-53. 2022. 10.11113/elektriKA.v21n2.354.
9. Волчков Ю.Д., Лансберг А.А. Изготовление лабораторного стенда для исследования комбинированных токовых реле типа РТ-80 // В сборнике: Молодежная наука - развитию агропромышленного комплекса. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2020. С. 195-199.
10. Григорьев Д.А., Гусев Ю.П., Колесникова К.В., Смотров Н.Н., Чо Г.Ч. Анализ причин ложной работы логических защит в сетях 20 кВ при росте емкостных токов // Релейная защита и автоматизация. Сентябрь. 2021. №03(44). С. 8-15.
11. Рычков А.В., Валов В.Н. Разработка защиты участков межсекционных связей КРУЭ 35 кВ ГТУ-ТЭС-200 от замыканий на землю и повышение надежности работы защиты при перемежающихся дуговых замыканиях // Релейная защита и автоматизация. Сентябрь. 2021. №03(44). С. 76-81.
12. Маруда И.Ф. Релейная защита линий 110-220 кВ для сохранения устойчивости электростанций. Линии с двухсторонним питанием // Электроэнергия. Передача и распределение. 2022. №3(72). С. 130-135.
13. Маруда И.Ф. Об упрощении релейной защиты линий 110-220 кВ в зоне динамической устойчивости генераторов электростанции // Электроэнергия. Передача и распределение. 2022. №2 (71). С. 74-81.
14. Лундалин А.А., Пузина Е.Ю., Худоногов И.А. Направления развития релейной защиты и автоматики в российских электрических сетях // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. №2(62). С. 77-85. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).
15. Китушин В.Г. Надежность энергетических систем. Часть 1. Теоретические основы: Учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2003. 256 с. ISBN 5-7782-0309-8.
16. Волчков Ю.Д., Лансберг А.А., Виноградов А.В., Голиков И.О. Анализ элементной базы устройств, использующихся в релейной защите и автоматике силовых трансформаторов с высшим напряжением 35-110 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2022. № 2 (68). С. 26-42.
17. Виноградова, Алина Васильевна. Энергосистема Орловской области: обзор статистической информации / А.В. Виноградова, А.А. Лансберг, А.В. Виноградов. Под ред. д.т.н. Виноградова А.В. // Монография. – Орёл: изд-во «Картуш», 2023. – 360 с.

Авторы публикации

Виноградов Александр Владимирович – д-р тех. наук., доцент, заведующий лабораторией электроснабжения и теплообеспечения Федерального научного агроинженерного центра ВИМ. E-mail: winaleksandr@gmail.com

Лансберг Александр Александрович - специалист лаборатории электроснабжения и теплообеспечения Федерального научного агроинженерного центра ВИМ.. E-mail: lansbergaa@vk.com

Волчков Юрий Дмитриевич - канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение» Орловского государственного аграрного университета. E-mail: volchkov.yurij@yandex.ru

Виноградова Алина Васильевна - канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории электроснабжения и теплообеспечения Федерального научного агроинженерного центра ВИМ. E-mail: alinawin@rambler.ru.

References

1. Abdelmoumene Abdelkader, Bentarzi Hamid. A review on protective relays' developments and trends. *Journal of Energy in Southern Africa*. 25. 2014. 10.17159/2413-3051/2014/v25i2a2674.
2. Balakrishna P., Kanabar Mital, Muthukrishnan, Vijaysarathi. *Power system asset management using advanced protection relays*. Conference: 2017 7th International Conference on Power Systems (ICPS). 2017. pp. 836-841. 10.1109/ICPES.2017.8387405.
3. Sahebkar Farkhani Jalal, Zarecin Mohammad, Najafi Arsalan, Melicio Rui, Rodrigues Eduardo. The Power System and Microgrid Protection-A Review. *Applied Sciences*. 10. 1-30. 2020. 10.3390/app10228271.
4. Rajalwal Nilesh, Ghosh Debomita. *Recent trends in integrity protection of power system: A literature review*. International Transactions on Electrical Energy Systems. 2020. 10.1002/2050-7038.12523.
5. Bentarzi Hamid. *Fault Tree-Based Root Cause Analysis Used to Study Mal-Operation of a Protective Relay in a Smart Grid*. In book: Research Anthology on Smart Grid and Microgrid Development. 2022. pp. 348-367. 10.4018/978-1-6684-3666-0.ch016.
6. Alimkhan Aisultan, Abukhan Aishabibi. *Overview of Relay Coordination using Adaptive Protection Scheme for the interconnected distribution system*. 2019. 10.13140/RG.2.2.16072.98562.
7. Zhang Zhaoyun, Chen Wei, Zhang Zhutian. Research on the relay protection system of micro-grid. *Tehnicki Vjesnik*. 22. (2015). 51-59. 10.17559/TV-20150210221236.
8. Idris Rasyidah, Mohamed Siti. Coordination of Overcurrent Relay In Distribution System. *Elektrika - Journal of Electrical Engineering*. 21. 50-53. 2022. 10.11113/elektrika.v21n2.354.
9. Volchikov YuD, Lansberg AA. Manufacture of a laboratory stand for the study of combined current relays of the RT-80 type. In the collection: *Youth science - development of the agro-industrial complex. Materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists*. 2020:195-199.
10. Grigoriev DA., Gusev YuP, Kolesnikova KV, et al. Analysis of the causes of false operation of logic protections in 20 kV networks with an increase in capacitive currents. *Relay protection and automation*. 2021;03(44):8-15.
11. Rychkov AV, Valov VN. Development of protection of sections of intersectional connections of the 35 KV GTU-TPP-200 from earth faults and increasing the reliability of protection during intermittent arc circuits. *Relay protection and automation*. 2021;03(44):76-81.
12. Maruda IF. Relay protection of 110-220 kV lines to preserve the stability of power plants. Lines with two-way power supply. *Electric power. Transmission and distribution*. 2022;3(72):130-135.
13. Maruda IF. About simplification of relay protection of 110-220 kV lines in the zone of dynamic stability of power plant generators. *Electric power. Transmission and distribution*. 2022;2(71):74-81.
14. Lundalin AA, Puzina EYu, Khudonogov IA. Directions of development of relay protection and automation in Russian electric networks. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2019;2(62):77-85. doi: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).
15. Kidushin VG. Reliability of energy systems. Pt 1. *Theoretical foundations: A textbook*. Novosibirsk: Publishing house of NSTU. 2003. 256 p. ISBN 5-7782-0309-8.
16. Volchikov YuD, Lansberg AA, Vinogradov AV, Golikov I.O. Analysis of the element base of devices used in relay protection and automation of power transformers with a higher voltage of 35-110 kV of the branch of PJSC «Rosseti Center»-«Orelenenergo». *Vesti of higher educational institutions of the Chernozem region*. 2022;2(68):26-42.
17. Vinogradova Alina Vasilyevna. The power system of the Orel region: a review of statistical information / AV. Vinogradova, AA. Lansberg, AV. Vinogradov. Edited by Doctor of Technical Sciences Vinogradov A.V. Monograph. Orel: publishing house «Cartouche», 2023. 360 p.

Authors of the publication

Alexander V. Vinogradov – Federal Scientific Agroengineering Center VIM. E-mail: winaleksandr@gmail.com

Alexandr A. Lansberg – Federal Scientific Agroengineering Center VIM. E-mail: lansbergaa@vk.com

Yuri D. Volchkov - Orel State Agrarian University Email: volchkov.iurij@vandex.ru

Alina V. Vinogradova – Federal Scientific Agroengineering Center VIM. E-mail: alinawin@rambler.ru

Шифр научной специальности:

2.4.2 Электротехнические комплексы и системы (технические науки)

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

2.4.5 Энергетические системы и комплексы (технические науки)

Получено **21.03.2023г.**

Отредактировано **06.04.2023г.**

Принято **12.04.2023г.**

ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Суслов К.В.^{1,2}, Солонина Н.Н.¹, Солонина З.В.¹, Ахметшин А.Р.³

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

³Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<http://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, dr.souslov@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1774-4826>, nafisa-solonina@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1683-8126>, zoyasolo@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>, dr.akhmetshin@ieee.org

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Актуальной задачей является повышения надежности и качества электроснабжения. Очень часто сбои в работе обусловлены повреждением воздушных и кабельных линий. Традиционно достаточно большое количество нарушений приходится на долю распределительных электрических сетей. Для надежного функционирования энергосистем и бесперебойного электроснабжения потребителей необходимо в короткие сроки выявить и устранить неисправности для минимизации ущерба. Таким образом, необходим метод для эффективного, точного и надежного определения места повреждения необходим как для энергетических компаний, так и для потребителей. Для решения данной проблемы необходимо оперативное получение информации о состоянии распределительной электрической сети. ЦЕЛЬ. Сокращение времени поиска места повреждения в электрических сетях, снижение ущерба от простоя за недоотпуск электроэнергии путем анализа существующих методов определения места повреждений на линии электропередачи и разработки метода его оперативного выявления в электрических сетях. МЕТОДЫ. Основой данного метода является предварительный теоретический расчет токов короткого замыкания в различных сечениях линии электропередачи. На основе полученных в результате расчета величин осуществляется сравнение измеренных значений токов коротких замыканий с данными величинами, на основании чего и происходит определение места повреждения линии. Разработан алгоритм поиска левой и правой границы значения тока короткого замыкания в упорядоченном массиве статистических данных. РЕЗУЛЬТАТЫ. Предлагается метод оперативного определения места короткого замыкания, в основе которого лежит использование массива данных теоретически рассчитанных токов короткого замыкания. Представленный алгоритм способен точно определить координаты места короткого замыкания в электрических сетях. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предложенный метод определения места повреждения линии электропередачи позволяет повысить оперативность определения точки короткого замыкания и тем самым снизить время на устранение аварии, следовательно, экономические потери от недоотпуска электроэнергии. Основой данного метода является предварительный теоретический расчет токов короткого замыкания в различных сечениях линии электропередачи. Благодаря последующему осуществлению сравнения измеренных значений токов коротких замыканий с величинами расчетных значений происходит определение места повреждения линии электропередачи. Представленный алгоритм разработан для точного определения координат места короткого замыкания, что позволяет существенно сократить время поиска и повысить точность определения места повреждения в диапазоне от 100 до 150 м независимо от длины линии электропередачи, что значительно сокращает время поиска повреждений одновременно с решением задачи по уменьшению времени простоя, а также минимизации ущерба как для гарантирующих поставщиков в лице электросетевых компаний, так и для потребителей в лице промышленных, сельскохозяйственных предприятий.

Ключевые слова: определение места повреждения линии; распределительные электрические сети; бесперебойность электроснабжения; алгоритм поиска точного места короткого замыкания в линии.

Для цитирования: Суслов К.В., Солонина Н.Н., Солонина З.В., Ахметшин А.Р. Эффективный метод определения места короткого замыкания в электрических сетях// Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 71-83. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-71-83.

OPERATIONAL DETERMINATION OF THE POINT OF A SHORT CIRCUIT IN POWER LINES

KV. Suslov^{1,2}, NN. Solonina¹, ZV. Solonina¹, AR. Akhmetshin³

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

² National Research University "MPEI", Moscow, Russia

³ Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<http://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, dr.souslov@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1774-4826>, nafisa-solonina@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1683-8126>, zoyasolo@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>, dr.akhmetshin@ieee.org

Abstract: *RELEVANCE.* An urgent task is to improve the reliability and quality of power supply. Very often, failures in operation are caused by damage to overhead and cable lines. Traditionally, a fairly large number of violations occur in the share of electrical distribution networks. For the reliable functioning of power systems and uninterrupted power supply to consumers, it is necessary to identify and eliminate faults in a short time to minimize damage. Thus, a method for efficient, accurate and reliable fault location is needed for both utility companies and consumers. To solve this problem, it is necessary to quickly obtain information about the state of the distribution eclectic network. *THE PURPOSE.* Reducing the time to search for a fault location in electrical networks, reducing damage from downtime for undersupply of electricity by analyzing existing methods for determining the location of faults on a power transmission line and developing a method for its prompt detection in electrical networks. *METHODS.* The basis of this method is a preliminary theoretical calculation of short-circuit currents in various sections of a power line. Based on the values obtained as a result of the calculation, the measured values of the short-circuit currents are compared with these values, on the basis of which the location of the line damage is determined. An algorithm for searching the left and right boundaries of the short-circuit current value in an ordered array of statistical data has been developed. *RESULTS.* A method for quickly determining the location of a short circuit is proposed, which is based on the use of a data array of theoretically calculated short circuit currents. The presented algorithm is able to accurately determine the coordinates of the short circuit in electrical networks. *CONCLUSION.* The proposed method for determining the location of damage to the power line allows you to increase the efficiency of determining the point of a short circuit and thereby reduce the time to eliminate the accident, and therefore, economic losses from undersupply of electricity. The basis of this method is a preliminary theoretical calculation of short-circuit currents in various sections of a power line. Due to the subsequent comparison of the measured values of short-circuit currents with the values of the calculated values, the location of the damage to the power line is determined. The presented algorithm is designed to accurately determine the coordinates of the short circuit location, which can significantly reduce the search time and improve the accuracy of determining the fault location in the range from 100 to 150 m, regardless of the length of the power line, which significantly reduces the time to search for damage at the same time as solving the problem of reducing downtime, as well as minimizing damage both for guaranteeing suppliers represented by electric grid companies, and for consumers represented by industrial and agricultural enterprises.

Keywords: determining the location of line damage; distribution electrical networks; uninterrupted power supply; algorithm for finding the exact location of a short circuit in the line.

For citation: Suslov KV, Solonina NN, Solonina ZV, Akhmetshin. AR. Operational determination of the point of a short circuit in power lines. *Powerengineering: research, equipment, technology*. 2023; 25(2):71-83. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-71-83.

Введение (Introduction)

Изменения, происходящие в сфере энергетического комплекса, ставят повышенные требования к оперативности получения и обработки информации о текущем состоянии энергосистемы [1-6].

Актуальность задачи снижения ущерба субъектов экономики за счет повышения надежности и качества электроснабжения все чаще обосновывается государственными структурами с точки зрения быстрого роста нового цифрового сектора экономики. В настоящее время предпринимается ряд мер для обеспечения требований по надежности и качеству поставки электроэнергии. Однако, несмотря на все предпринимаемые меры в процессе обеспечения высокой надежности силового электротехнического оборудования и систем управления, наблюдаются сбои в их работе [1, 3, 5]. Они, в частности, обусловлены повреждением воздушных и кабельных линий. Следует отметить, что традиционно достаточно большое количество нарушений приходится на долю распределительных электрических сетей. Для надежного функционирования энергосистем и бесперебойного электроснабжения потребителей необходимо в короткие сроки выявить и устранить неисправности для минимизации ущерба.

Распределительная сеть является важной частью энергосистемы, которая включает генерацию, передачу и распределение. Электроэнергия поставляется потребителям через распределительную сеть. Неисправности в распределительной сети могут привести к отключению электроэнергии, снижению надежности, вызвать провалы напряжения и другие проблемы с качеством электроэнергии. В отличие от высоковольтной линии передачи, распределительная сеть имеет более сложную топологическую структуру, более непостоянный поток мощности и более разнообразные методы заземления. Таким образом, метод для эффективного, точного и надежного определения места повреждения (ОМП) необходим как для энергетических компаний, так и для потребителей.

Для снижения ущерба, в том числе связанного с простоем оборудования, необходимо как можно быстрее восстановить электроснабжение. Для решения данной проблемы необходимо оперативное получение информации о состоянии распределительной электрической сети.

Литературный обзор (Literature Review)

Как уже указывалось ранее, проблема определения места повреждения в линиях является актуальной задачей. В связи с этим в настоящее время имеется достаточно большое количество разработанных методов для обнаружения и локализации неисправностей в распределительных электрических сетях. Имеется ряд обзорных работ в данном направлении [7-9].

Важно отметить, что в настоящее время основное различие методов определения места повреждения линий делается между централизованными и децентрализованными методами [10, 11]. Основным отличием данных методов друг от друга является способ и организация проведения измерений.

В работах [12, 13], полагая, что линия является однородной, использован алгоритм определения места повреждения, основанный на методе импеданса. Выражение для напряжения узла может быть установлено на основе значения тока или напряжения, полученного в точке локатора. Затем могут быть рассчитаны расстояние до места повреждения и сопротивление заземления. В работах [14-16] были изучены характеры провалов напряжения в случае повреждения, т.е. провалы напряжения, распространяющиеся с различными величинами и фазовыми углами на фидерном узле. Для алгоритма использовались данные о токе и напряжении до и во время повреждения. Местоположение повреждения устанавливалось путем сопоставления величины провалов напряжения и фазового угла во время повреждения.

В работах [17-19] использовался метод бегущей волны. Однако, из-за относительно коротких линий и более сложной топологической структуры распределительных сетей, традиционный метод бегущей волны в этом случае менее эффективен.

Децентрализованные методы начали применяться с развитием средств связи и ростом числа интеллектуальных электронных устройств для определения неисправностей в линии. Однако они способны определить лишь поврежденный участок, а не точное местоположение неисправности.

Недостатки этих двух методов можно устранить при сочетании децентрализованных и основанных на бегущей волне методов. Децентрализованный метод поможет выявить неисправную ветвь и участок линии между двумя индикаторами, а волновой метод позволит определить точное расстояние до места неисправности.

К примеру, результат ОМП может быть улучшен при сочетании с другими методами, такими как вейвлет-преобразование, *ANN*, генетический алгоритм и т.д. Также в [18-21] были предложены другие методы, такие как метод байесовских сетей, метод, основанный на измерении токов и напряжений нулевой последовательности, метод инъекции.

Также к децентрализованным способам получения информации относятся усовершенствованная измерительная инфраструктура (*Advanced Metering Infrastructure*) [22] и импульсный метод, для его использования требуются только текущие измерения. Однако сложность их использования состоит в необходимости установки на подстанции источника сигнала. Кроме того, они неприменимы к незаземленным нейтральным сетям.

Не требует измерения напряжения метод, основанный на постоянном изменении тока отрицательной последовательности, что является основным отличием от импульсного метода. Его преимуществом является то, что не требуются устройства для посылки импульса. Но для его проверки необходимы полевые испытания.

В [23] методы подразделяются на традиционные и методы искусственного интеллекта. К традиционным относятся волновой и импедансный методы.

К методам искусственного интеллекта относятся:

- нечеткой логики;
- опорных векторов;
- подход сопоставления;
- генетический алгоритм.

В работе [24] предложен алгоритм локализации повреждений параллельных линий электропередачи путем анализа распределения напряжения. Алгоритм эффективен для несинхронизированных данных. Способ определения повреждений однофазного заземления, разработанный на основе алгоритма метода *k*-ближайших соседей (*k*-NN), был представлен в работе [25]. В качестве характеристик модели были приняты гармонические составляющие, полученные в результате дискретных преобразований Фурье для трехфазной системы напряжений. Метод опорных векторов использовался в статье [26] для классификации повреждений в линиях электропередачи. Алгоритм обратного распространения ошибки и вейвлет-преобразование использовались в [27] для локализации неисправности в одноцепной линии передачи. В статьях [28, 29] были предложены алгоритмы вейвлет-преобразования и метода опорных векторов для поиска повреждений.

Недостатком интеллектуальных методов является необходимость подготовки данных для обработки, что отнимает много времени. В [23] для сокращения времени предлагается сочетание различных методов определения зоны неисправностей.

Волновой метод основан на измерении напряжения и тока в момент короткого замыкания (КЗ). Локализация повреждений на основе метода импеданса осуществляется односторонним и двусторонним способами. При одностороннем подходе ток и напряжение измеряются только с одного конца линии. Достоинствами этого подхода являются экономичность и простота реализации, а для радиальных электрических линий они представляют собой только лишь одно техническое решение. Измерение напряжения и тока с обоих концов линии электропередач должно выполняться при двустороннем методе.

Точность измерения в данном методе зависит от [30]:

- переходных составляющих тока;
- погрешностей, вызванных насыщением сердечника трансформатором тока;
- ёмкостными составляющими линии электропередач;
- переходным сопротивлением в месте КЗ и др.

Точность измерения является чрезвычайно важным параметром для всех существующих методов. При использовании данного метода погрешность определения места повреждения может достигать 20 процентов. С учетом того что линии электропередач часто имеют большую протяженность, погрешность в определении места повреждения в таких случаях может составлять до 300 м. Это приводит к большим трудозатратам и увеличению времени для поиска места повреждения, что отрицательным образом скажется на длительности прекращения электроснабжения.

Материалы и методы (Materials and methods)

Предлагается метод оперативного определения места КЗ. В основе метода лежит использование массива данных теоретически рассчитанных токов КЗ. Предлагается следующая последовательность действий. Прежде всего, составляется схема замещения с

учетом конфигурации и параметров линии в различных точках линии. Величина интервала между расчетными точками выбирается в зависимости от требуемой точности расчета, чем меньше интервал, тем выше точность. Затем предварительно рассчитанные токи КЗ необходимо сравнить с величинами реальных токов, и на этой основе определить координату точки, т.е. начало участка линии, где произошло КЗ. Имеется возможность корректировки результата с учетом реально измеренного напряжения. Для этого необходимо производить одновременное точное измерение величины напряжения в точке присоединения.

Данные величины фиксируются в момент КЗ, путем измерения токов и напряжений в непрерывном режиме и происходит обновление памяти. Это, к примеру, позволяет локализовать место самоустранившегося КЗ и исключить в будущем повторения данного инцидента.

Для пояснения предлагаемого метода сначала рассмотрим наиболее простой вариант - ток КЗ формируется одним источником, (рис. 1). На рисунке 1 представлена расчетная схема, позволяющая определить точку повреждения линии для случая с одним источником.

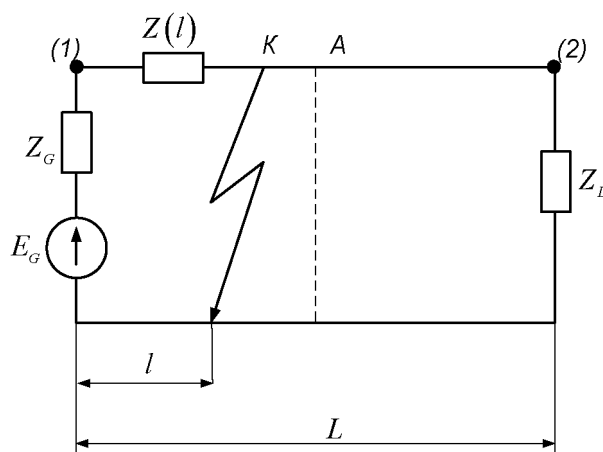


Рис. 1. Расчетная схема для определения места повреждения линии при КЗ

Fig. 1. Calculation scheme for determining the location of damage to the line in case of a short circuit

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

На рисунке 1 приведены следующие обозначения:

l – расстояние до точки КЗ К от начала линии;

E_G – электродвижущая сила (ЭДС) системы;

L – длина линии; $Z(l)$ – величина сопротивления линии на участке до точки КЗ от ее начала;

Z_G – внутреннее сопротивление системы;

Z_L – сопротивление линии.

Согласно предлагаемой авторами методики необходимо рассчитать токи КЗ при 3-х, 2-х и однофазном замыканиях. Для расчетов используются следующие формулы:

$$I_{sc}^{(3)} = \frac{E_G}{Z_G + Z(l)} \quad (1)$$

$$I_{sc}^{(2)} = \frac{E_G}{Z_G + 2Z(l)} \quad (2)$$

$$I_{sc}^{(1)} = \frac{E_G}{Z_G + Z(l) + Z(N)} \quad (3)$$

где $Z(N)$ – сопротивление до заземлителя от точки КЗ; $I_{sc}^{(3)}$, $I_{sc}^{(2)}$, $I_{sc}^{(1)}$ – начальные действующие значения токов КЗ, при 3-х, 2-х и однофазном замыканиях, соответственно.

В этом случае, при наличии информации о параметрах линии, можно теоретически рассчитать зависимость величины токов КЗ от длины l : $I_{sc}^{(3)}(l)$, $I_{sc}^{(2)}(l)$, $I_{sc}^{(1)}(l)$.

Для пояснения предлагаемого метода рассмотрим наиболее общий случай, когда на величину тока КЗ в линии оказывают существенное влияние сразу несколько источников. Таковыми источниками могут являться: питающая система, мощные электродвигатели,

обобщенные нагрузки, синхронные компенсаторы, а также различные источники распределенной генерации.

Для реализации предлагаемого подхода рассмотрим следующий алгоритм. В первую очередь необходимо составить полную схему замещения, активные и пассивные участки цепи представить в виде источников ЭДС и сопротивлений, как при использовании традиционной методики расчета токов КЗ. В конечном счете, составляется итоговая схема замещения, с помощью которой выполняется расчет токов КЗ в линии, рис. 2.

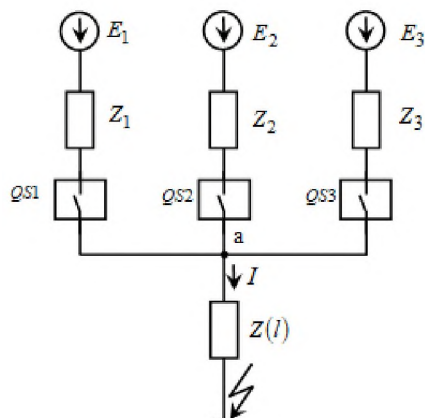


Рис. 2. Итоговая эквивалентная схема замещения для расчета токов КЗ в линии с тремя источниками

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

На рисунке 2 приведены следующие обозначения:

QS1, QS2, QS3 – выключатели;

E1, E2, E3 – источники;

Z1, Z2, Z3 – эквивалентные сопротивления участка цепи до начала рассматриваемой линии от источников;

Z(l) – сопротивление участка линии от начала до точки КЗ, отстоящей от начала линии на расстоянии l.

Важно отметить, что число эквивалентных источников зависит от конфигурации сети. Составляется набор возможных конфигураций электрической сети. Расчеты производятся для различных конфигураций электрической сети при заданной номинальной величине напряжения. Результат расчетов выглядит как массив значений токов для различных типов КЗ при заданных расстояниях от начала линии l. В таблице 1 представлен пример массива статистических данных значений токов КЗ.

Таблица 1

Table 1

Массив статистических данных значений токов КЗ

Set of statistical data values of currents K3

i	l_b m	$I_i^{(3)}$ кА	i	l_b m	$I_i^{(2)}$ кА	i	l_b m	$I_i^{(1)}$ кА
1	l_1	$I_1^{(3)}$	1	l_1	$I_1^{(2)}$	1	l_1	$I_1^{(1)}$
2	l_2	$I_2^{(3)}$	2	l_2	$I_2^{(2)}$	2	l_2	$I_2^{(1)}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$i-1$	l_{i-1}	$I_{i-1}^{(3)}$	$i-1$	l_{i-1}	$I_{i-1}^{(2)}$	$i-1$	l_{i-1}	$I_{i-1}^{(1)}$
i	l_i	$I_i^{(3)}$	i	l_i	$I_i^{(2)}$	i	l_i	$I_i^{(1)}$
$i+1$	l_{i+1}	$I_{i+1}^{(3)}$	$i+1$	l_{i+1}	$I_{i+1}^{(2)}$	$i+1$	l_{i+1}	$I_{i+1}^{(1)}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
n	l_n	$I_n^{(3)}$	n	l_n	$I_n^{(2)}$	n	l_n	$I_n^{(1)}$

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Здесь

i – номер расчетной точки возможного КЗ;

l_i – расстояние до точки КЗ от начала линии;

n – общее число точек расчета.

Причем массив данных I_i упорядочен по возрастанию, то есть $\forall i \in [1, n]. I_i < I_{i+1}$.

Результаты (Results)

Для реализации данного подхода необходимо в начале линии разместить первичные преобразователи напряжения и тока для осуществления мониторинга текущих действующих значений тока и напряжения с последующим хранением в концентраторе данных и постоянным обновлением.

Измерения поступают от первичных датчиков в реальном времени текущих действующих значений линейных напряжений U в точке присоединения линии к системе, а также определяются фактические значение частоты f и периода T напряжения, в постоянном режиме обновляются. Что позволяет хранить их значения в памяти, полученные даже непосредственно перед самым моментом КЗ.

Точное значение периода необходимо для определения начального значения периодической составляющей тока КЗ. Для чего через промежутки времени, кратные точному значению периода, определяются и фиксируются мгновенные значения тока и определяются текущее значение реального значения тока и период, где наибольшее действующее значение тока. Массив числовых значений найденного периода поступает в дальнейшую обработку, а именно методами цифровой фильтрации выделяется только основная гармоника, и определяется ее действующее значение, которое в дальнейшем сравнивается со значениями, определенными теоретически.

Производится измерение величин начальных действующих значений токов КЗ всех 3-х фаз в течение первого периода после КЗ. При помощи логического устройства определяется конфигурация электрической сети. Данная конфигурация изменяется при помощи выключателей, и поэтому по их состоянию можно определить конфигурацию сети в каждый конкретный момент времени. Информация о состоянии выключателей поступает по каналам связи. При помощи выражений (1-3) определяется тип КЗ (3-х, 2-х или однофазное). Происходит это по следующей методике:

1. В случае, если токи 3-х фаз примерно равны -3-х фазное симметричное КЗ.
2. В случае, если два тока равны и существенно превышают третий ток-2-х фазное несимметричное КЗ.
3. В случае, если ток одной из фаз существенно превышает токи других фаз-однофазное КЗ.

При известной величине напряжения в точке «а» (рис.2) в момент, который предшествует КЗ, корректируются данные массива. Корректировка производится, основываясь на предположении, что расчетные токи линейно связаны с напряжением.

После определения типа КЗ для всех трех видов КЗ используем предлагаемый далее алгоритм расчета точного места повреждения, реализованный в среде *Matlab*.

Пусть в результате однофазного КЗ получили некоторое значение тока $I_*^{(1)}$. Определение точного места КЗ производим в два этапа.

1. Находим в исходном массиве данных значение $I_i^{(1)} = I_*^{(1)}$. Если данного значения в массиве нет $\forall i \in [1, n] I_i^{(1)} \neq I_*^{(1)}$, то находим ближайшие значения $I_{i-1}^{(1)}$ и $I_i^{(1)}$, такие, что $I_{i-1}^{(1)} < I_*^{(1)} < I_i^{(1)}$. Для этого доработаем алгоритм поиска элемента в упорядоченном массиве методом деления пополам. После доработки мы получили алгоритм поиска в упорядоченном массиве левой и правой границы для заданного значения (рис. 3).

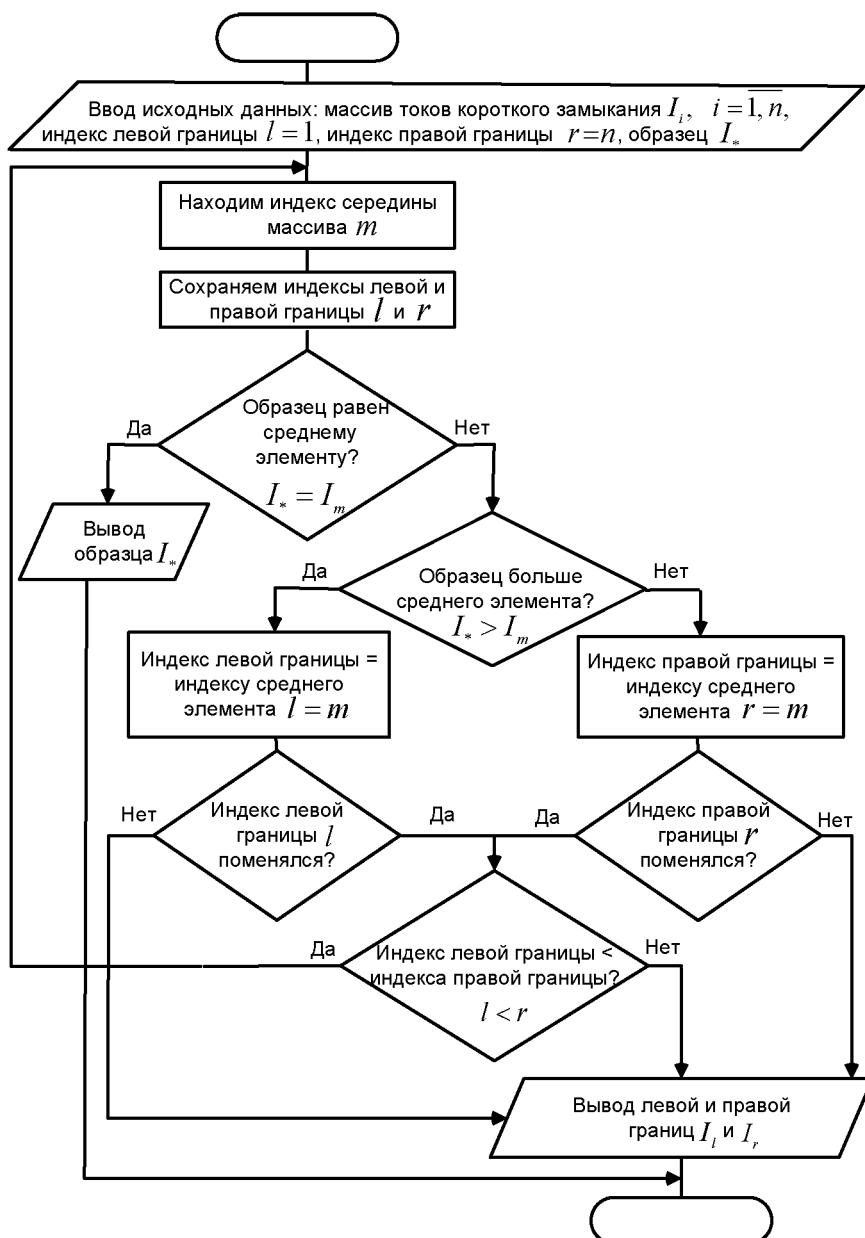


Рис. 3. Алгоритм поиска левой и правой границы значения тока КЗИ* в упорядоченном массиве статистических данных I_i .

Fig. 3. Algorithm for searching the left and right boundaries of the value of the short circuit current I_* in the ordered array of statistical data I_i .

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Рассмотрим работу алгоритма на примере. Пусть получено значение тока КЗИ* = 22 кАи дан упорядоченный массив статистических данных значений I_i , $i = \overline{1, 20}$:

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...	17	18	19	20
I_i , кА	15	19	21	24	26	27	28	33	35	38	41	...	63	67	68	73

Тогда пошаговый алгоритм поиска будет следующий:

l	m	r		
1	10	20	$m=(1+20)/2=10$ (округляем до целого по нижнему уровню), $I_m = 38$	$22 < 38$
1	5	10	$m=(1+10)/2=5$, $I_m = 26$	$22 < 26$
1	3	5	$m=(1+5)/2=3$, $I_m = 21$	$22 > 21$
3	4	5	$m=(3+5)/2=4$, $I_m = 21$	$22 < 24$
3	3	4	$m=(3+4)/2=3$, $I_m = 21$	$22 > 21$
			$I_l = 21, I_r = 24$	

Таким образом, мы определили, что интересующее нас значение тока $K3I_*$ лежит в интервале (21, 24).

2. Зная ближайшие $KI_*^{(1)}$ значения токов КЗ $I_{i-1}^{(1)}$ и $I_i^{(1)}$ и соответствующие им расстояния l_{i-1} и l_i , используем линейную интерполяцию для более точного определения места $K3I_*$:

$$l_* = l_{i-1} + \frac{l_i - l_{i-1}}{I_i^{(1)} - I_{i-1}^{(1)}} (I_*^{(1)} - I_{i-1}^{(1)})$$

Аналогично производим поиск места КЗ для 2-х и 3-х фазных замыканий. Данный метод предполагает точное измерение токов и напряжений.

Обсуждение (Discussions)

Однако необходимо обратить внимание на следующее: расчет начального действующего значения тока КЗ производится в предположении, что напряжение, а, следовательно, и ток в линии были синусоидальными. В реальных условиях, к примеру, в магистральных линиях доля гармоник может составлять единицы процентов. Следовательно, гармоники могут существенно увеличить действующее начальное значение измеренного тока по сравнению с расчетным, что вызовет соответствующую погрешность определения места КЗ. Например, при длине линии в 100 км ошибка в 1% существенно усложнит поиск места повреждения ЛЭП. Для уменьшения этой составляющей погрешности необходимо выделить основную гармонику выходного напряжения методом цифровой фильтрации. Для этого необходимо запомнить мгновенные значения тока КЗ в течение первого периода непосредственно после КЗ. Логическое устройство обрабатывает полученные данные и выделяет начальное значение основной гармоники, которая сравнивается с расчетными табулированными значениями.

Заключение (Conclusions)

В заключении необходимо отметить следующее:

1. Предложенный метод определения места повреждения линии электропередачи позволяет повысить оперативность определения точки КЗ и тем самым снизить время на устранение аварии, следовательно, экономические потери от недоотпуска электроэнергии.

2. Основой данного метода является предварительный теоретический расчет токов КЗ в различных сечениях линии электропередачи. Благодаря последующему осуществлению сравнения измеренных значений токов КЗ с величинами расчетных значений происходит определение места повреждения линии электропередачи.

3. Представленный алгоритм разработан для точного определения координат места КЗ, что позволяет существенно сократить время поиска и повысить точность определения места повреждения в интервале от 100 до 150 м, что значительно сокращает время поиска повреждений одновременно с решением задачи по уменьшению времени простоя, а также минимизации ущерба как для гарантирующих поставщиков в лице электросетевых компаний, так и для потребителей в лице промышленных, сельскохозяйственных предприятий.

Литература

1. Суслов К.В., Солонина Н.Н., Смирнов А.С. Повышение надежности функционирования автономных систем электроснабжения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012, №10. С.240-245.
2. Грачева Е.И., Денисова Н.В., Иванов В.О. Надежность электроэнергетических систем и их объектов: монография - Казань, 2011.
3. Khasanov S.R., Grachieva E.I., Toshkhodzhaeva M.I., et al. Reliability modeling of high-voltage power lines in a sharply continental climate // E3S Web of Conferences. Сер. «High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference, HSTED 2020» 2020. С. 01051.
4. Суслов К.В., Солонина Н.Н., Солонина З.В., и др. Повышение точности определения места повреждения в линиях электропередачи // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 3(47). С. 3-13.
5. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А. Р., и др. Исследование электрических нагрузок многоквартирных жилых комплексов в период распространения новой коронавирусной инфекции // Вопросы электротехнологии. 2021. № 2(31). С. 57-67.

6. Федотов, А.И., Абдуллазиев Р.Э., Мударисов Р.М. Методики оценки устойчивости синхронных двигателей при трехфазных коротких замыканиях в системе внешнего электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 3-4. С. 102-112.
7. Stefanidou-Voziki P., Sapountzoglou N., Raison B., Dominguez-Garcia J.L. A review of fault location and classification methods in distribution grids // Electric Power Systems Research, 2022, vol. 209, August, 108031
8. Gururajapathy S.S., Mokhlis H., Illias H.A. Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, vol. 74. pp. 949-958.
9. Dragomir M., Miron A., Istrate M., Dragomir A. A review of Impedance-based Fault Location Approaches for Transmission Lines // 2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE 2014), Iasi, Romania.
10. Baldwin T., Kelle D., Cordova J., Beneby N. Fault locating in distribution networks with the aid of advanced metering infrastructure // 2014 Clemson University Power Systems Conference, Clemson, SC, USA.
11. Wang X., Du H., Liang Z., Guo L., et al. Single phase to ground fault location method of overhead line based on magnetic field detection and multi-criteria fusion // International Journal of Electrical Power & Energy Systems 2023, vol. 145, 108699
12. Yin Z., Zhinong Z., Sun G., Zang H., et al. High sensitivity fault location technology for distribution networks considering measurement error // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, vol. 140, 108055
13. Mokhlis H., Li H. Non-linear representation of voltage sag profiles for fault location in distribution networks // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, vol. 33 (1), pp. 124-130.
14. Pereira RAF, da Silva LGW, Kezunovic M, Mantovani JRS. Improved fault location on distribution feeders based on matching during-fault voltage sags // IEEE Transactions on Power Delivery 2009, V. 24(2). pp. 852-62.
15. Borghetti A, Bosetti M, Di Silvestro M, et al. Continuous wavelet transform for fault location in distribution power networks: definition of mother wavelets inferred from fault originated transients // IEEE Transactions Power Systems, 2008, vol. 23(2) – pp. 380-388.
16. Pourahmadi-Nakhli M, Safavi AA. Path characteristic frequency-based fault locating in radial distribution systems using wavelets and neural networks // IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, Vol. 26(2). pp. 772-781.
17. Tawfik M.M., Morcos M.M. Fault location on loop systems using the Prony algorithm // Electric Power Components and Systems, 2006, V. 34(4). pp. 433-443.
18. Jiang K., Wang H., Zhang L., et al. Fault Location in Active Distribution Networks Using Multiple Measurement-Based Bayesian Learning // 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)
19. Li J, Liang J. 10kv straight line fault location based on signal injection method // 2011 IEEE power engineering and automation conference, PEAM 2011,
20. Xiaowei W, Shu T, Zhan Z, et al. A novel method of fault location for distribution network // 2011 international conference on advanced power system automation and protection (APAP). 2011. V. 2. p. 1525-8.
21. Zeng H., Chen S., Zhang Z., et al. Single phase grounding fault detection and section location method based on non power frequency signal injection // 2022 China International Conference on Electricity Distribution (CICED).
22. Rivas A.E.L. Abrão T., Faults in smart grid systems: Monitoring, detection and classification // Electric Power Systems Research, 2020. V. 189, 106602.
23. Gururajapathy S.S., Mokhlis H., Illias H.A. Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017, V. 74. P. 949-958.
24. Song G.B., Suonan J., Xu Q.Q., et al. Parallel transmission lines fault location algorithm based on differential component net // IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, V. 20(4). pp. 2396-2406.
25. Farshad M, Sadeh J. Accurate single-phase fault-location method for transmission lines based on k-nearest neighbor algorithm using one-end voltage // IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, V. 27(4). pp. 2360-2367.
26. Bhalja. B, Maheshwari R.P. Wavelet-based fault classification scheme for a transmission line using a support vector machine // Electric Power Components and Systems, 2008, V. 36(10). pp. 1017-1030.
27. Ngaopitakkul A, Pothisarn C. Discrete wavelet transform and back-propagation neural

networks algorithm for fault location on single-circuit transmission line// IEEE international conference on robotics and biomimetics, ROBIO 2008. p. 1613–1618.

28.Ahanch M., Asasi M.S., McCann R. Transmission lines fault detection, classification and location considering wavelet support vector machine with harrishawks optimization algorithm to improve the SVR training // 2021 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), 2021.

29.Malathi V, Marimuthu N. Multi-class support vector machine approach for fault classification in power transmission line // IEEE international conference on sustainable energy technologies, ICSET 2008. p. 67–71.

30.Mousaviyan I., Seifossadat G.S., Saniei M. Traveling Wave-based Algorithm for Fault Detection, Classification, and Location in STATCOM-Compensated Parallel Transmission Lines // Electric Power Systems Research, 2022, V. 210, 108118.

Авторы публикации

Суслов Константин Витальевич – д-р.техн.наук., доцент, профессор кафедры «Гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии» Национального исследовательского университета «МЭИ», профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета.

Солонина Нафиса Назиповна – канд.техн.наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжения и электротехники» Иркутского национального исследовательского технического университета.

Солонина Зоя Валерьевна – канд.экон.наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета.

Ахметшин Азат Ринатович – канд.техн.наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета, член технического комитета по стандартизации ТК 337 «Электроустановки зданий», член национального исследовательского комитета РНК СИГРЭ ВЗ «Подстанции и электроустановки», член Institute of Electrical and Electronics Engineers.

References

1. Suslov KV, Solonina NN, Smirnov AS. Improving the reliability of the functioning of autonomous power supply systems. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. - 2012, No. 10.- P.240-245.

2. Grachieva EI, Denisova NV, Ivanov VO. *Reliability of electric power systems and their facilities: monograph* - Kazan, 2011.

3. Khasanov SR, Grachieva EI, Toshkhodzhaeva MI, et al. *Reliability modeling of high-voltage power lines in a sharply continental climate*. E3S Web of Conferences. Ser. «High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference, HSTED 2020» 2020. P. 01051.

4. Suslov KV, Solonina NN, Solonin ZV, Akhmetshin A. R., Improving the accuracy of determining the location of damage in power lines. *Bulletin of the Kazan State Power Engineering University*. 2020;12:3 (47):3-13.

5. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, et al. *Study of electrical loads in multi-apartment residential complexes during the spread of a new coronavirus infection*. Issues of electrical technology. 2021;2 (31):57-67.

6. Fedotov AI, Abdullazyanov RE, Mudarisov RM. *Methods for assessing the stability of synchronous motors with three-phase short circuits in the system of external power supply* // *Izvestiya of higher educational institutions. Energy problems*. 2019;21(3-4):102-112.

7. Stefanidou-Voziki P, Sapountzoglou N, Raison B, *A review of fault location and classification methods in distribution grids*. Electric Power Systems Research, 2022, Vol. 209, August, 108031.

8. Gururajapathy SS, Mokhlis H, Illias HA. *Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017;74:949-958.

9. Dragomir M, Miron A., Istrate M., Dragomir A. *A review of Impedance-based Fault*

- Location Approaches for Transmission Lines*. 2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE 2014), Iasi, Romania.
10. Baldwin T., Kelle D., Cordova J., Beneby N. *Fault locating in distribution networks with the aid of advanced metering infrastructure*. 2014 Clemson University Power Systems Conference, Clemson, SC, USA.
11. Wang X, Du H, Liang Z, et al. *Single phase to ground fault location method of overhead line based on magnetic field detection and multi-criteria fusion*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 2023;14:108699.
12. Yin Z, Zhinong Z, Sun G, et al. *High sensitivity fault location technology for distribution networks considering measurement error*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022;140:108055.
13. Mokhlis H, Li H. *Non-linear representation of voltage sag profiles for fault location in distribution networks*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, vol. 33(1), pp. 124-130.
14. Pereira R.A.F., da Silva L.G.W., Kezunovic M, Mantovani J.R.S. *Improved fault location on distribution feeders based on matching during-fault voltage sags*. IEEE Transactions on Power Delivery 2009; 42(2):852–62.
15. Borghetti A, Bosetti M, Di Silvestro M, Nucci CA, Paolone M. *Continuous wavelet transform for fault location in distribution power networks: definition of mother wavelets inferred from fault originated transients*. IEEE Transactions Power Systems, 2008;23(2):380-388.
16. Pourahmadi-Nakhli M, Safavi AA. *Path characteristic frequency-based fault locating in radial distribution systems using wavelets and neural networks*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011;26(2):772–781.
17. Tawfik M.M, Morcos M.M. *Fault location on loop systems using the Prony algorithm*. Electric Power Components and Systems, 2006;34(4):433–443.
18. Jiang K., Wang H., Zhang L., Yang W., Zhou C., He B. *Fault Location in Active Distribution Networks Using Multiple Measurement-Based Bayesian Learning*. 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)
19. Li J, Liang J. *10kv straight line fault location based on signal injection method* // 2011 IEEE power engineering and automation conference, PEAM 2011.
20. Xiaowei W, Shu T, Zhan Z, Shuai W. *A novel method of fault location for distribution network*. 2011 international conference on advanced power system automation and protection (APAP). 2011;2:1525-8.
21. Zeng H., Chen S., Zhang Z., Li H., He S., Wu C. *Single phase grounding fault detection and section location method based on non power frequency signal injection* // 2022 China International Conference on Electricity Distribution (CICED).
22. Rivas A.E.L, Abrão T., *Faults in smart grid systems: Monitoring, detection and classification* // Electric Power Systems Research, 2020, vol. 189, 106602.
23. Gururajapathy S.S., Mokhlis H., Illias H.A. *Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017;74:949–958.
24. Song GB, Suonan J, Xu QQ, et al. *Parallel transmission lines fault location algorithm based on differential component net*. IEEE Transactions on Power Delivery. 2005;20(4):2396–2406.
25. Farshad M, Sadeh J. *Accurate single-phase fault-location method for transmission lines based on k-nearest neighbor algorithm using one-end voltage*. IEEE Transactions on Power Delivery. 2012;27(4):2360–2367.
26. Bhalja B, Maheshwari R.P. *Wavelet-based fault classification scheme for a transmission line using a support vector machine*. Electric Power Components and Systems. 2008;36(10):1017–30.
27. Ngaopitakkul A, Pothisarn C. *Discrete wavelet transform and back-propagation neural networks algorithm for fault location on single-circuit transmission line*. IEEE international conference on robotics and biomimetics, ROBIO 2008. p. 1613–1618.
28. Ahanch M, Asasi MS, McCann R. *Transmission lines fault detection, classification and location considering wavelet support vector machine with harrishawks optimization algorithm to improve the SVR training*. 2021 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), 2021.
29. Malathi V, Marimuthu N. *Multi-class support vector machine approach for fault classification in power transmission line*. IEEE international conference on sustainable energy technologies, ICSET 2008. p. 67–71.

30.Mousaviyan I, Seifossadat GS, Saniei M. *Traveling Wave-based Algorithm for Fault Detection, Classification, and Location in STATCOM-Compensated Parallel Transmission Lines*. Electric Power Systems Research, 2022;210:108118.

Authors of the publication

Konstantin V. Suslov – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, National Research University MPEI, Moscow, Russia.

Nafisa N. Solonina – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Zoya V. Solonina – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

AzatR. Akhmetshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности:

2.4.3. Электроэнергетика (технические науки)

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

2.4.5 Энергетические системы и комплексы (технические науки)

Получено 22.02.2023г.

Отредактировано 30.02.2023г.

Принято 06.03.2023г.



**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ПРИМЕРЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПОДСТАНЦИИ
«КАБУН-1» (СИРИЙСКАЯ АРАБСКАЯ РЕСПУБЛИКА)**

Грачева Е.И.¹, Ахмад М-Насер Альзаккар¹, Valtchev S.²

^{1,2}Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

³UNINOVA–CTS, Faculty of Sciences and Technology University NOVA of Lisbon
2829-516 Campus Caparica, Portugal

²<https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>, Ahmadalzakkar86@gmail.com

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ:* Любое устройство, когда повышается его температура, со временем теряет свою работоспособность, силовые трансформаторы так же. Проблемы перегрева и изоляции являются основными факторами, которые влияют на рабочее состояние силовых трансформаторов. Таким образом, исследование имеет высокую актуальность и прикладную востребованность, потому что, нагрев элементов силовых трансформаторов, особенно на территории Сирийской Арабской Республике может достигать 46 °С. Мониторинг состояния силовых трансформаторов имеет определяющее значение при исследовании показателей надежности и безопасности в энергосистеме. Термическое напряжение является одним из основных параметров, который необходимо контролировать. Резкие колебания температуры обмотки трансформатора, масла, изолирующей среды и т. д. влияют на условия эксплуатации, срок службы и безопасность эксплуатации трансформаторов. *ЦЕЛЬ.* Целью является определение вида функциональных зависимостей температуры нагрева обмоток и масла силовых трансформаторов от их загрузки. *МЕТОДЫ.* Определение вида функциональных зависимостей изменения температуры обмоток и масла силовых трансформаторов с использованием методов статистической обработки данных, аппроксимирующих функций и оценкой их достоверности. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Разработаны аппроксимирующие функции основных температурных параметров элементов силовых трансформаторов - функция температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры масла; функция температуры среднего перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха; функция температуры перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха; функция температуры перегрева наиболее нагретой точки сверх температуры охлаждающего воздуха. Определены коэффициенты детерминации полученных функций температуры среднего перегрева обмотки и средней ошибки аппроксимации. В результате исследований установлено, что полиномиальная функция является наиболее достоверной. Разработанные зависимости могут быть использованы для практического применения для оценки и анализа температуры нагрева масла и обмоток трансформаторов при известной их загрузке, а также для управления режимами эксплуатации электрооборудования и потребителей электроэнергии систем электроснабжения.

Ключевые слова: силовой трансформатор; условия охлаждения; температура обмотки; температура масла; коэффициент загрузки.

Для цитирования: Грачева Е.И., Ахмад М-Насер Альзаккар., Valtchev S. Исследование температурных режимов элементов силовых трансформаторов на примере трансформаторов подстанции «кабун-1» (Сирийская Арабская Республика) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 84-96. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-84-96.

**STUDY OF THE TEMPERATURE CONDITIONS OF POWER TRANSFORMERS
ELEMENTS FOR EXAMPLE TRANSFORMERS AT SUBSTATION
«KABUN-1» (SYRIAN ARAB REPUBLIC)**

EI. Gracheva¹, A. Alzakkar¹, Valtchev S.²

^{1,2}Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³UNINOVA–CTS, Faculty of Sciences and Technology University NOVA of Lisbon
2829-516 Campus Caparica, Portugal

²<https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>, Ahmadalzakkar86@gmail.com

Abstract: *RELEVANCE.* Any device loses its performance over time, Power transformers too. The problems of overheating and insulation are the main influencing factors to the operation status of power transformers. Thus, the study is of high relevance and applied demand, because the heating of power transformer elements, especially in the territory of the Syrian Arab Republic, can reach 46 °C. Monitoring the state of power transformers is of decisive importance in the study of reliability and safety indicators in the power system. Thermal stress is one of the main parameters to be controlled. Sharp fluctuations in the temperature of the transformer winding, oil, insulating medium, etc. affect the operating conditions, service life and safety of transformers. *PURPOSE.* Determination of the type of functional dependences of the heating temperature of windings and oil of power transformers on their loading. *METHODS.* Determination of the type of functional dependences of the change in the temperature of the windings and oil of power transformers using the methods of statistical data processing, approximating functions and assessing their reliability. *RESULTS.* Approximating functions of the main temperature parameters of power transformer elements have been developed - a function of the temperature of the average overheating of the winding above the oil temperature; function of the temperature of the average overheating of the oil above the temperature of the cooling air; oil superheat temperature function above the cooling air temperature; superheat function of the hottest spot above the cooling air temperature. The coefficients of determination of the obtained temperature functions of the average overheating of the winding and the average approximation error are determined. As a result of the research, it was found that the polynomial function is the most reliable. The developed dependencies can be used for practical application to assess and analyze the heating temperature of oil and transformer windings with a known load, as well as to control the operating modes of electrical equipment and consumers of electrical energy in power supply systems.

Key words: power transformer; cooling conditions; winding temperature; oil temperature; load factor.

For citation: Gracheva EI. Alzakkar A. Valtchev S. Study of the temperature conditions of power transformers elements for example transformers at substation «Kabun-1» (Syrian Arab Republic) *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(2):84-96. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-84-96.

Введение (Introduction)

В связи с климатическими условиями высоких температур в Сирии особое внимание уделяется повышению эффективности работы силовых трансформаторов. Ниже представлен анализ некоторых научных работ авторов, проводящих исследования в данной области.

Так, Е.И. Грачевой, А. Альзаккар [1] определены данные параметров графиков нагрузок электропотребителей объектов г. Адра (Сирия), статистические данные суммарной полной мощности электропотребителей трансформаторов подстанции «Кабун-1» напряжением 33/11 кВ. В своей работе Е.И. Грачева, О.В. Наумов, Р.Р. Садыков [2] рассматривают природу возникновения потерь холостого хода силовых трансформаторов, причины увеличения данных потерь за период эксплуатации. На основе обработки статистических данных оцениваются значения этих изменений. Показана необходимость учета реальных потерь холостого хода трансформаторов при расчете потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях.

В [3] Э.Ю. Абдуллазянов, Е. И. Грачева, А. Альзаккар, М.Ф. Низамиев, О.А. Шумихина, S. Valtchev провели исследование, позволяющее повысить достоверность прогнозирования величины электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных предприятиях. При этом, предлагается использовать динамику изменения величины эквивалентного сопротивления внутривоздушных сетей электроснабжения, что позволит управлять режимами расхода электроэнергии и вносить корректировки в процессы прогнозирования.

A.S. Semenov, M.N. Semenova, Y.V. Bebikhov [4] провели исследование и разработали универсальные математические модели для их использования при проектировании новых и реконструкции действующих систем электроснабжения промышленных предприятий. A. Dixit; C. Ekanayake; Hui Ma. [5] в своем исследовании провели анализ вычислительных алгоритмов для сравнения характеристик охлаждения трансформатора, заполненного минеральным маслом и трансформатора, заполненного натуральным эфирным маслом.

Wang, L. Zhou, S. Yuan, J. Wang [6] представили улучшенную динамическую тепловую модель с предварительным физическим моделированием для трансформаторов в режиме охлаждения ONAN. О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев [7] разработали дополнительную систему охлаждения силовых масляных трансформаторов, способную обеспечить снижение пиковой нагрузки и ее равномерное распределение в течение всей продолжительности работы оборудования за счет аккумуляции холода.

В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, И.Н. Малышев [8] разработали дополнительную систему охлаждения силового трансформатора с термоэлектрическими преобразователями. Результаты исследований показали возможность использования предлагаемой системы жидкостного охлаждения силовых масляных трансформаторов с помощью термоэлектрических модулей и ВГТО. В. А. Камакиным, Д. В. Волковой [9] определены электрические, геометрические и тепловые характеристики трансформатора ТМ-160/10. А также определены 2D-распределения температуры и плотности тепловых потоков в трансформаторе в продольном и поперечном разрезах.

А. С. Хисматуллин, М. В. Кофановым, Ш. Д. Каримовым в [10] рассмотрена модернизированная система охлаждения масляного трансформатора с использованием элегаза и последующей его очисткой от примесей в мембранном фильтре. Показана целесообразность применения фильтра очистки элегаза в модернизированной системе охлаждения масляного трансформатора. Е. Ю. Комков, А. И. Тихонов в [11] разработали универсальную модель управления системой охлаждения силового трансформатора с принудительным охлаждением, реализованную в среде математического процессора MATLAB. Модель построена на основе данных системы мониторинга силовых трансформаторов и математического аппарата нейронных сетей.

Ю. Н. Тимониным, В. А. Сушкиным в [12] разработана система управления групповым электроприводом для насосных агрегатов и вентиляторов системы охлаждения силового трансформатора, которая состоит из частотно - регулируемого преобразователя, микропроцессорной системы управления и переключающей контактной аппаратуры.

М. Г. Баширов, М. Р. Миннибаев, А. С. Хисматуллин [13] предлагают новый способ охлаждения масляных трансформаторов с помощью разработанной программы увеличения коэффициентов переноса при всплытии пузырьков газа в жидкости и проведенных экспериментов по изучению этого явления.

Научной и практической значимостью предлагаемой статьи являются результаты проведенных исследований, показывающие, что в условиях высоких температур летом в Сирии (которые могут достигать 46 °С) необходимо особое внимание уделять анализу процессов в системах охлаждения трансформаторов. Разработанные модели аппроксимирующих функций оценки температурных режимов – температуры нагревания масла и обмоток трансформаторов с использованием коэффициента загрузки, могут быть рекомендованы для практического применения при исследовании режимных параметров трансформаторов с номинальной мощностью 20 000 кВА. Необходимо контролировать температуру нагрева элементов конструкции трансформаторов, которая не должна превышать нормируемые значения для обеспечения длительного срока службы трансформаторов. Что является особенно актуальным в настоящее время, в связи с введением экономических санкций со стороны недружественных стран по отношению к Сирийской Арабской Республике.

Отличие представленной работы от результатов других исследований, заключаются в том, что впервые исследованы условия работы трансформаторов напряжением 33/11 кВ (подстанция «Кабун-1», Сирия) и определены функциональные зависимости основных температурных параметров элементов трансформаторов от их загрузки.

Материалы и методы (Materials and methods)

Параметры температуры режимов

На подстанции «Кабун-1» установлены 2 трансформатора мощностью 20 000 кВА и напряжением 33/11 кВ, которые питают промышленные предприятия в г. Агра-Сирия. Таблица 1 показывает характеристики этих трансформаторов.

Таблица 1
Table 1Основные характеристики трансформатора 33/11 кВ
Main characteristics of the 33/11 kV transformer

Тип (Марка)	УТЕС (Саудовская Аравия)
Серийный №	5-04-005-01-268
Охлаждение	ONAN
Тип охлаждения	Д
Фаз	3
Частота	50 Гц
S_N	20 000 кВА
Векторный групп	D/Yn -11
В.Н	33 кВ
Н.Н	11 кВ
Z_T	10 %
Класс изоляции	A
$P_{кз}$	19140 кВт
$\Delta P_{хх}$	900 кВт
$\theta_{обм.макс}$	98,5 °С
$\theta_{обм.сред}$	85,5 °С

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Исследуем температурные режимы нагрева отдельных элементов конструкции трансформаторов. Используем следующие обозначения переменных:

$\theta_{обм.макс}$ — значение номинальной температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора;

$\theta_{обм.сред}$ — номинальное значение средней по сопротивлению температуры обмотки трансформатора.

Значение температуры нагрева элемента конструкции трансформатора θ определяется величиной потерь в данном элементе и температурой охлаждающей среды $\theta_{о.с.}$, то есть температурой воздуха.

Превышение температуры элемента трансформатора $\theta_{пр}$ относительно температуры охлаждающей среды $\theta_{о.с.}$ определяется по выражению:

$$\theta_{пр} = \theta - \theta_{о.с.} \quad (1)$$

Значения допустимых температур масла и обмоток трансформаторов показаны в таблице 2.

Таблица 2
Table 2Значение допустимых температур масла и обмоток
Value of permissible oil and winding temperatures

Параметр	Обозначение (°С)	Величина
Средние по сопротивлению температуры обмотки значения сверх значения температуры масла.	$\theta_{обм.сред}$	22
Средние по сопротивлению температуры обмотки значения сверх значения температуры воздуха.	$\theta_{обм.сред}$	66
Средняя по объёму значения температуры масла над значением температуры охлаждающего воздуха	$\theta_{мс.сред}$	45
Значение температуры масла в верхнем слое сверх значения температуры охлаждающего воздуха.	$\theta_{мс-макс}$	56
Значение температуры наиболее нагретой точки обмотки над средним значением по сопротивлению температуры обмотки	$\theta_{мс-макс} - \theta_{обм.сред}$	14
Значение температуры наиболее нагретой точки обмотки над значением температуры охлаждающего воздуха	$\theta_{мс-макс}$	78

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Для закрытых трансформаторных подстанций с естественной приточной вентиляцией значение эквивалентной температуры воздуха принимается на 8°С выше температуры наружного воздуха.

Коэффициент детерминации

Для исследования функциональных зависимостей параметров, установления взаимосвязи между переменными и построения моделей аппроксимации, используется коэффициент детерминации.

Коэффициент детерминации (R^2) — это мера, которая предоставляет информацию о соответствии модели. В контексте регрессии это статистическая мера того, насколько достоверно линия регрессии аппроксимирует фактические данные [14, 15].

При этом статистическая модель используется либо для прогнозирования будущих результатов, либо для проверки гипотез. Коэффициент R^2 лежит в диапазоне от 0 до 1. Чем ближе значение коэффициент к единице, тем существеннее взаимозависимость переменных.

В нашем исследовании независимой переменной является температура нагрева элемента трансформатора ($y=t_{\text{сред}}$), а зависимой переменной является его коэффициент загрузки ($x=K_{\text{з}}$).

Коэффициент R^2 вычисляется по уравнению:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

y_i — фактические значения;

$\hat{y}$ — расчетные значения исследуемой величины;

$\bar{y} = \frac{\sum_i y_i}{n}$ — среднее значение исследуемой величины;

$\sum_i (y_i - \hat{y})^2$ — сумма квадратов ошибок регрессии;

$\sum_i (y_i - \bar{y})^2$ — сумма квадратов отклонений точек данных от среднего значения.

Средняя ошибка аппроксимации вычисляется по выражению:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_i \left| \frac{(y_i - \hat{y})}{y_i} \right| \quad (3)$$

n — Количество фактических значений.

Построение функций аппроксимации

В таблице 3 показаны фактические значения функциональных зависимостей между коэффициентом загрузки ($K_{\text{з}}$) и допустимыми температурами масла и обмоток трансформатора (t_1, t_2, t_3, t_4) подстанции «Кабун-1», где:

$t_1(^{\circ}\text{C})$ — значение температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры масла;

$t_2(^{\circ}\text{C})$ — значение температуры среднего перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха;

$t_3(^{\circ}\text{C})$ — значение температуры перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха;

$t_4(^{\circ}\text{C})$ — значение температуры перегрева наиболее нагретой точки сверх температуры охлаждающего воздуха.

Таблица 3

Table 3

Фактические значения температуры элементов трансформатора подстанции «Кабун-1» в зависимости от его загрузки

Actual temperature values of elements of substation «Kabun-1» transformer depending on its load

$K_{\text{з}}=x$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$t_1=y_1$	1	5	8	10	20	25	35	45	55	70	85
$t_2=y_2$	1	7	10	20	30	45	60	80	100	120	150
$t_3=y_3$	1	8	13	25	40	55	75	105	140	160	180
$t_4=y_4$	1	13	30	45	60	90	120	150	180	220	260

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Исследуем значение температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры масла. При этом возможные аппроксимирующие функции представим следующими выражениями, используя данные таблице 3:

Экспоненциальная:

$$t_1 = 2,7697 \cdot e^{1,9146 K_{\text{з}}} \quad (4)$$

Линейная:

$$t_1 = 41,182K_{32} - 85,455 \quad (5)$$

Полиномиальная:

$$t_1 = 17,541K_{32}^2 + 6,1K_{32} + 1,979 \quad (6)$$

Вычислим коэффициент детерминации по выражению (2) для полиномиальной функции:

Фактические значения получены из таблицы 3:

$$t_i = 1; 5; 8; 10; 20; 25; 35; 45; 55; 70; 85 \quad (7)$$

Расчетные значения с помощью уравнения (6):

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= 17,541K_{32}^2 + 6,1K_{32} + 1,979 \\ K_{32} = 0 &\Rightarrow \hat{t}_1 = 17,541(0)^2 + 6,1(0) + 1,979 = 1,979 \\ K_{32} = 0,2 &\Rightarrow \hat{t}_2 = 17,541(0,2)^2 + 6,1(0,2) + 1,979 = 3,9 \\ &\vdots \\ K_{32} = 2 &\Rightarrow \hat{t}_{11} = 17,541(2)^2 + 6,1(2) + 1,979 = 84,34 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Среднее значение:

$$\left. \begin{aligned} \bar{t} &= \frac{\sum_i t_i}{n} = \frac{1+5+8+10+20+25+35+45+55+70+85}{11} \\ \bar{t} &= 32,636 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Подставим (7), (8), (9) в (2):

$$\left. \begin{aligned} R^2 &= 1 - \frac{\sum_i (t_i - \hat{t})^2}{\sum_i (t_i - \bar{t})^2} \\ R^2 &= 1 - \frac{(1-1,979)^2 + \dots + (85-84,343)^2}{(1-32,636)^2 + \dots + (85-32,636)^2} = 0,998 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Чем ближе значение коэффициента к 1, тем существеннее взаимозависимость переменных. Далее вычислим среднюю ошибку аппроксимации, подставляя (7) и (8) в (3):

$$\left. \begin{aligned} \bar{A} &= \frac{1}{n} \sum_i \left| \frac{(t_i - \hat{t})}{t_i} \right| \\ \bar{A} &= \frac{1}{11} \left(\left| \frac{1-1,979}{1} \right| + \dots + \left| \frac{85-84,343}{85} \right| \right) \cdot 100\% = 7,192 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Ошибка составляет менее 10%, что свидетельствует о достаточно высокой точности аппроксимации. Результаты расчета показаны в таблице 4.

Таблица 4.

Table 4

Результаты расчета коэффициента детерминации для полиномиальной функции

Determination coefficient calculation results for a polynomial function

$t_i = t_1$	$\hat{t}$	$\bar{t}$	$(t_i - \hat{t})^2$	$(t_i - \bar{t})^2$	$\sum_i (t_i - \hat{t})^2$	$\sum_i (t_i - \bar{t})^2$	R^2	$\bar{A}, \%$
1	1,979	32,636	0,958	1000,855	14,017	7898,545	0,998	7,192
5	3,90068		1,208	763,765				
8	7,22564		0,599	606,947				
10	11,953		3,817	512,402				
20	18,085		3,665	159,676				
25	25,62		0,384	58,313				
35	34,558		0,195	5,587				
45	44,899		0,01	152,861				
55	56,644		2,703	500,135				
70	69,792		0,043	1396,046				
85	84,343		0,431	2741,957				

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В таблице 5 приведены уравнения аппроксимации функциональных параметров температуры (t_1 , t_2 , t_3 , t_4).

Таблица.5.

Table 5

Уравнения аппроксимации функциональных зависимостей температуры установившегося перегрева элементов трансформатора от его коэффициентов загрузки
Equations for approximating the functional dependencies of the temperature of the fixed overheating of the transformer elements from its load factors

Аппроксимирующая функция		R2	$\bar{A}\%$
t_1 (°C)			
Экспоненциальная	$t_1 = 2,7697e^{1,9146K_{32}}$	0,711	9,97%
Линейная	$t_1 = 41,182K_{32} - 85,455$	0,945	85,16%
Полиномиальная	$t_1 = 17,541K_{32}^2 + 6,1K_{32} + 1,979$	0,998	7,2%
t_2 (°C)			
Экспоненциальная	$t_2 = 3,5496e^{2,127K_{32}}$	0,50	16,61%
Линейная	$t_2 = 73,5K_{32} - 16,864$	0,947	161,81%
Полиномиальная	$t_2 = 30,798K_{32}^2 + 11,903K_{32} + 1,6154$	0,999	4,49%
t_3 (°C)			
Экспоненциальная	$t_3 = 4,0746e^{2,208K_{32}}$	0,292	21,41%
Линейная	$t_3 = 94,5K_{32} - 21,591$	0,952	205%
Полиномиальная	$t_3 = 35,111K_{32}^2 + 24,279K_{32} - 0,5245$	0,993	13,84%
t_4 (°C)			
Экспоненциальная	$t_4 = 6,456e^{2,1634K_{32}}$	0,127	41,49%
Линейная	$t_4 = 129,23K_{32} - 22,955$	0,968	218%
Полиномиальная	$t_4 = 41,171K_{32}^2 + 46,885K_{32} + 1,7483$	0,999	6,3%

Обсуждение результатов

Графики аппроксимирующих функций

По данным таблицы 5, установлено, что полиномиальная функция является наиболее точной для всех исследуемых параметров – t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , т.к. коэффициент детерминации ближе к единице и процент средней ошибки аппроксимации наименьший. В то же время, наименее точной функцией рассматриваемых параметров, является экспоненциальная.

На рисунке 1 приведены графики аппроксимирующих функций температуры установившегося перегрева от коэффициентов загрузки трансформаторов для значений: t_1 (°C) — температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры масла; t_2 (°C) — температуры среднего перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха; t_3 (°C) — температуры перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха; t_4 (°C) — температуры перегрева наиболее нагретой точки сверх температуры охлаждающего воздуха.

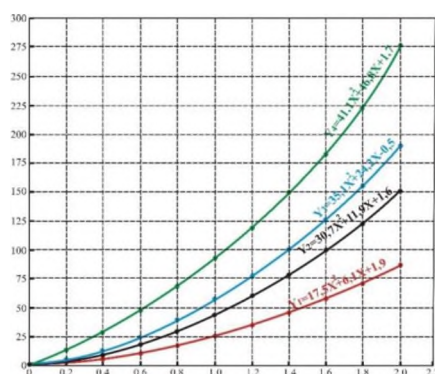


Рис. 1. Графики аппроксимирующих функций (полиномиальные) Fig. 1. Graphs of functions approximation (polynomial)

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Расчёт значения установившейся средней температуры нагрева обмотки ($t_{\text{обм.сред.к}}$)

Определим, нагрев обмотки и масла трансформатора при изменении нагрузки [16] по выражению:

$$\theta_{\text{кон}}(t) = \theta_{\text{нач}} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)} + \theta_{\text{кон}} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)}\right] \quad (12)$$

где $\theta_{\text{кон}}(t)$ — значение перегрева элемента конструкции трансформатора в момент времени t ;

где $\theta_{\text{нач}}$ — значение перегрева элемента конструкции трансформатора для $t=0$, определяется нагрузкой трансформатора за предыдущий интервал времени [17, 18] (В нашем исследовании установлено $\theta_{\text{нач}}=30^\circ\text{C}$).

где $\theta_{\text{кон}}$ — значение конечного перегрева, установившегося за время $3T_0$ при постоянной нагрузке;

где T_0 — значение постоянной времени нагрева [19, 20], которое определяется по таблице 6.

Таблица 6

Table 6

Значения постоянных времени нагрева трансформатора
Transformer Heating Time Constant Value

Номинальная мощность трансформаторов, кВА	Тип охлаждения	T_0 , час
До 630	М	2,5
1000-6300	М	3,5
10 000-32 000	Д	2,5
40 000-63 000	Д	3,5
100 000-125 000	ДЦ	2,5

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В нашем исследовании значение постоянной времени нагрева трансформатора 20 000 кВА, установленного на подстанции «Кабун-1», $T_0=2,5$ ч.

Для климатической зоны Сирии значение эквивалентной годовой температуры $\theta_{\text{о.с.эвк}}=26^\circ\text{C}$.

Определим значение установившейся средней температуры нагрева обмотки по выражению:

$$t_{\text{обм.сред.к}} = \theta_{\text{о.с.эвк}} + \theta_{\text{обм.сред.к}} \quad (13)$$

где $\theta_{\text{обм.сред.к}}$ — значение перегрева обмотки относительно воздуха определяется по выражению:

$$\theta_{\text{обм.сред.к}} = \theta_{\text{обм.сред.м.к}} + \theta_{\text{м.сред.к}} \quad (14)$$

где $\theta_{\text{обм.сред.м.к}}$ — значение перегрева обмотки относительно масла;

$\theta_{\text{м.сред.к}}$ — значение перегрева масла относительно воздуха.

Из таблицы 5 значение температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры масла:

$$\theta_{\text{обм.сред.м}} = 17,541K_{\text{зг}}^2 + 6,1K_{\text{зг}} + 1,979 \quad (15)$$

Значение температуры среднего перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха:

$$\theta_{\text{м.сред}} = 30,798K_{\text{зг}}^2 + 11,903K_{\text{зг}} + 1,615 \quad (16)$$

С помощью (12), выражения (15) и (16) будут иметь вид:

$$\theta_{\text{обм.сред.м}}(t) = \theta_{\text{нач}} \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{нач}}}} + \left(17,541K_{\text{зг}}^2 + 6,1K_{\text{зг}} + 1,979\right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{нач}}}}\right) \quad (17)$$

$$\theta_{\text{м.сред}}(t) = \theta_{\text{нач}} \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{нач}}}} + \left(30,798K_{\text{зг}}^2 + 11,903K_{\text{зг}} + 1,615\right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{нач}}}}\right) \quad (18)$$

Подставим (17) и (18) в (14):

$$\theta_{\text{обм.сред}}(t) = \theta_{\text{обм.сред.м}}(t) + \theta_{\text{м.сред}}(t) \quad (19)$$

$$\theta_{\text{обм.сред}}(t) = 2 \cdot \theta_{\text{нач}} \cdot e^{\frac{-t}{T_{\text{нач}}}} + (38,339K_{\text{зг}}^2 + 18,003K_{\text{зг}} + 3,394) \left(1 - e^{\frac{-t}{T_{\text{нач}}}} \right)$$

С помощью выражения (16) и принимая во внимание следующие условия:

1. Длительность значения нагрузки в интервале ($t=1$ ч);
 2. значение постоянной времени нагрева ($T_{\text{нач}} = T_0 = 2.5$ ч);
 3. значение перегрева элемента конструкции трансформатора для $t=0$ ($\theta_{\text{нач}} = 30^\circ\text{C}$);
 4. значение эквивалентной годовой температуры для климата Сирии ($\theta_{\text{о.с.экв}} = 26^\circ\text{C}$);
- Тогда температура нагревания обмотки в конце периода t :

$$t_{\text{обм.сред}}(t) = \theta_{\text{о.с.экв}} + 60 \cdot e^{\frac{-t}{2.5}} + (38,339K_{\text{зг}}^2 + 18,003K_{\text{зг}} + 3,394) \left(1 - e^{\frac{-t}{2.5}} \right) \quad (20)$$

Покажем (17) и (18):

$$\theta_{\text{обм.сред.м}}(t=1 \text{ ч}) = 30 \cdot e^{\frac{-1}{2.5}} + (7,541K_{\text{зг}}^2 + 6,1K_{\text{зг}} + 1,979) \left(1 - e^{\frac{-1}{2.5}} \right) \quad (21)$$

$$\theta_{\text{обм.сред.м}}(t=1 \text{ ч}) = 2,488K_{\text{зг}}^2 + 2,013K_{\text{зг}} + 20,762$$

$$\theta_{\text{м.сред}}(t=1 \text{ ч}) = 30 \cdot e^{\frac{-1}{2.5}} + (30,798K_{\text{зг}}^2 + 11,903K_{\text{зг}} + 1,615) \left(1 - e^{\frac{-1}{2.5}} \right) \quad (22)$$

$$\theta_{\text{м.сред}}(t=1 \text{ ч}) = 10,163K_{\text{зг}}^2 + 3,928K_{\text{зг}} + 20,641$$

Подставляем (21) и (22) в (19):

$$\theta_{\text{обм.сред}}(t=1 \text{ ч}) = \theta_{\text{обм.сред.м}}(t=1 \text{ ч}) + \theta_{\text{м.сред}}(t=1 \text{ ч}) \quad (23)$$

$$\theta_{\text{обм.сред}}(t=1 \text{ ч}) = 12,651K_{\text{зг}}^2 + 5,94K_{\text{зг}} + 41,339$$

Значение температуры нагревания обмотки в конце часа ($\theta_{\text{о.с.экв}} = 26^\circ$):

$$t_{\text{обм.сред}}(t=1 \text{ ч}) = \theta_{\text{о.с.экв}} + \theta_{\text{обм.сред}}(t=1 \text{ ч}) \quad (24)$$

$$t_{\text{обм.сред}}(t=1 \text{ ч}) = 26 + 12,651K_{\text{зг}}^2 + 5,94K_{\text{зг}} + 41,339$$

$$t_{\text{обм.сред}}(t=1 \text{ ч}) = 12,651K_{\text{зг}}^2 + 5,94K_{\text{зг}} + 67,339$$

С помощью выражения (24) получим данные таблице 7.

Таблица 7
Table 7

Фактические значения температуры нагревания обмотки
Actual temperature of winding heating

Кзг	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$t_{\text{обм.сред.к}}$	67,34	69	71,73	75,45	80,18	85,93	92,68	100,45	109,23	119	129,82

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

На рисунке 2 показана графическая зависимость среднего значения установившейся температуры нагревания обмотки ($t_{\text{обм.сред.к}}$) $^\circ\text{C}$ от значения коэффициентов загрузки трансформаторов напряжением 33/11 подстанции «Кабун-1».

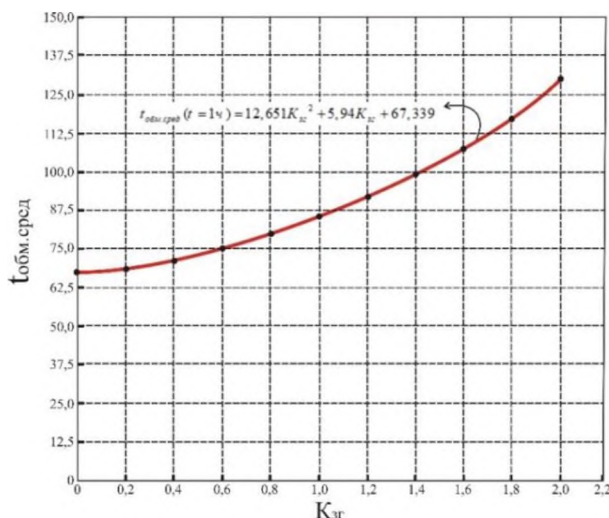


Рис.2. График эквивалентной температуры *Fig. 2. Graph of equivalent temperature*
 *Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

График на рисунке 2 показывает, что:

1. значение номинальной температуры среднего по сопротивлению значения температуры обмотки $t_{обм.сред} = 85^{\circ}\text{C}$ поэтому при $K_{гр} \geq 1.1$ наблюдается превышение конечного нагрева выше допустимого значения.

2. Конечный перегрев наблюдается в том случае, когда значение соответствующей нагрузки имеет место быть в период времени больший чем $3T_0$ при соответствующей длительности $t \geq 3 \times 2.5 = 7.5$ ч.

3. В интервале времени t меньшей чем $3T_0$, наблюдающийся нагрузки значение перегрева в конце интервала меньше, чем установившееся значение.

Заключение

В результате проведенных исследований разработаны:

1. аппроксимирующие функции температурных параметров элементов силовых трансформаторов:

- Функция температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры – масла ($\theta_{обм.сред,м} = t_1$);
- Функция температуры среднего перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха ($\theta_{обм.сред} = t_2$);
- Функция температуры перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха ($\theta_{м.сред} = t_3$);
- Функция температуры перегрева наиболее нагретой точки сверх температуры охлаждающего воздуха ($\theta_{м,макс} = t_4$).

2. Определены коэффициенты детерминации (R^2) разработанных функций и средняя ошибка аппроксимации (A%), которые показали, что полиномиальная функция является наиболее достоверной.

3. Определена функция средней температуры нагрева обмотки трансформаторов подстанции «Кабун-1» ($t_{обм.сред,к}$) при следующих исходных данных - динамики мощности нагрузки в интервале ($t=1$ ч); постоянной времени нагрева $T_0=2,5$ ч ; перегрева обмотки трансформатора для $t=0$ ($\theta_{нач}=30^{\circ}\text{C}$); эквивалентной годовой температуры для климата Сирии ($\theta_{о.с.эжв}=26^{\circ}\text{C}$).

Полученные температурные характеристики элементов трансформаторов могут быть рекомендованы для исследования и управления режимными параметрами оборудования систем электроснабжения.

Литература

1. Грачева Е.И., Альзаккар А. Анализ и исследование электропотребления объектов промышленной зоны г. Адра-Сирия. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 118-129. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-118-129.
2. Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыков Р.Р. Учет холостого хода трансформаторов в период эксплуатации при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016;(1-2):53-63. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-1-2-53-63>.

3. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Альзаккар А., Низамиев М.Ф., Шумихина О.А., Valtchev S. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 3-12. DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12.
4. Semenov A.S., Semenova M.N., Bebikhov Y.V. Development of universal mathematical model of electrical power supply system of area of industrial enterprise // International Russian Automation Conference (RusAutoCon), IEEE, 2019. P. 1-5. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867704.
5. A. Dixit; C. Ekanayake; Hui Ma. Thermal Analysis of Natural Cooling Type Distribution Transformer Retrofilled With Natural Ester Oil. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.29 Issue.1, 2022. DOI: 10.1109/TDEI.2022.3148447.
6. L. Wang, L. Zhou, S. Yuan, J. Wang. Improved dynamic thermal model with pre-physical modeling for transformers in ONAN cooling mode. IEEE Transactions on Power Delivery, vol.34, Issue. 4, 2019. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2903939.
7. О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев. Дополнительная система охлаждения масляных трансформаторов с применением термоэлектрических преобразователей// Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. Серия: Технические Науки 2017. № 5(21). С. 96-103.
8. А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, И.Н. Мадышев. Использование дополнительного охлаждения масляных трансформаторов при совместной работе термоэлектрических преобразователей и грунтовых теплообменников // Вестник Южно-Уральского государственного университета, 2018. Т. 18, № 1. С. 61–67. DOI: 10.14529/power180108.
9. Нгуен Тиен, Гильфанов К.Х. Тепловое моделирование маслонеполненного силового трансформатора ТМ - 160/10 // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №5. С. 141-151. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-5-141-151.
10. Хисматуллин А. С., Кофанов М. В., Каримов Ш. Д. Фильтрация элегаза в модернизированной системе охлаждения масляного трансформатора // Журнал: Наука и Бизнес: Пути Развития. 2019. № 5(95). С. 149-153. EDN KPOLZW.
11. Комков Е. Ю., Тихонов А. И. Разработка модели управления системой охлаждения силовых трансформаторов // Автоматизация в промышленности. 2008. № 8. С. 45-47.
12. Тимонин Ю. Н., Сушкин В. А. Система управления охлаждением трансформатора // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. № 6-1. С. 257-265. EDN PXPSKD.
13. Баширов М. Г., Минлибаев М. Р., Хисматуллин А. С. Повышение эффективности охлаждения силовых масляных трансформаторов // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал, 2014. № 2. С. 347-357. EDN STGYBV.
14. Макарова И. Л., Игнатенко А. М. Коэффициент детерминации для нелинейной регрессии // Евразийское Научное Объединение. 2018. № 3-3(37). С. 161-163. EDN YVSWMB.
15. Chicco D., Warrens J., Jurman G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. PeerJ Computer Science 7, 2021. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>.
16. Альзаккар А. Применение искусственных нейронных сетей для оценки устойчивости напряжения электроэнергетических систем в Сирии // Международный технико-экономический журнал. 2020. С.87-95.
17. Солуянов Ю. И., Федотов А. И., Галицкий Ю. Я. [и др.] Актуализация нормативных значений удельной электрической нагрузки многоквартирных домов в Республике Татарстан // Электричество. 2021. № 6. С. 62-71. DOI 10.24160/0013-5380-2021-6-62-71.
18. Солуянов Ю. И., Федотов А. И., Ахметшин А. Р., Солуянов В. И. Анализ фактических электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 6. С. 134-147. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-6-134-147. EDN MBYUSE.
19. R. Zanella; C. Nore; X. Mininger; F. Bouillault. Numerical Study of Cooling by Ferrofluids in an Electrical Transformer Using an Axisymmetric Model, IEEE Transactions on Magnetics. vol.57 Issue.7, 2021. DOI: 10.1109/TMAG.2021.3066412.
20. M. Daghrh, Z. Wang, Q. Liu. Experimental Study of the Influence of Different Liquids on the Transformer Cooling Performance. IEEE Transactions on Power Delivery, vol.34, Issue.2, 2019. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2895533.

Авторы публикации

Грачева Елена Ивановна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Альзаккар Ахмад – аспирант, Казанского государственного энергетического университета.

Stanimir Valtchev – Associate Professor of University NOVA of Lisbon, Portugal.

References

1. Gracheva EI, Alzakkar A. Analysis and study of power consumption of objects in the industrial zone of Adra-Syria. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(1) 118-129. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-118-129.
2. Gracheva EI, Naumov OV, Sadykov RR. Accounting losses of idling of transformers in the period of exploitation at calculation losses of the electric power in distributive networks. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016;(1-2):53-63. doi: 10.30724/1998-9903-2016-0-1-2-53-63.
3. Abdullazyanov E.Y., Gracheva E.I., Alzakkar A., Nizamiev M.F., Shumikhina OA, Valtchev S. Prediction and analysis of power consumption and power loss at industrial facilities. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(6):3-12. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12.
4. Semenov A.S., Semenova M.N., Bebikhov Y.V. *Development of universal mathematical model of electrical power supply system of area of industrial enterprise*. International Russian Automation Conference (RusAutoCon), IEEE, 2019. pp.1-5. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867704.
5. A. Dixit; C. Ekanayake; Hui Ma. *Thermal Analysis of Natural Cooling Type Distribution Transformer Retrofilled With Natural Ester Oil*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.29 Issue.1, 2022. doi: 10.1109/TDEI.2022.3148447.
6. L. Wang, L. Zhou, S. Yuan, J. Wang. *Improved dynamic thermal model with pre-physical modeling for transformers in ONAN cooling mode*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol.34, Issue. 4, 2019. doi: 10.1109/TPWRD.2019.2903939.
7. Dmitrieva OS, Dmitriev AV. Additional cooling system of oil transformers using thermoelectric converters. *Vestnik of Irkutsk State Technical University*. 2016;21(5):96-103.
8. Dmitriev AV, Dmitrieva OS, Madyshev IN. Use of Additional Cooling of Oil Transformers in the Joint Operation of Thermoelectric Converters and Ground-Coupled Heat Exchangers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018;18(1):61–67. doi: 10.14529/power180108.
9. Tien N, Gilfanov KH. Thermal modelling of oil-filled power transformer TM - 160/10. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(5):141-151. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-141-151.
10. Khismatullin AS, Kofanov MV, Karimov ShD, et al. SF6 Gas Filtration in Modernized Cooling System of Oil Transformer. *Journal: Science and Business: Ways of Development*, 2019;5:149–153.
11. Komkov EYu, Tikhonov AI. Control model development for a cooling system of power transformers. *Journal: Automation in Industry*, 2008;5:45–47.
12. Timonin Yu.N., Sushkin V.A. Managerial System by Cooling the Transformer. *Journal: News of Tula State University. Technical Science*, 2011, 6(1):257–265. EDN PXPSKD.
13. MG. Bashirov, MR. Minlibayev, AS. Hismatullin. Increase of efficiency of cooling of the power oil transformers. *Journal: The online edition Oil and Gas Business*, 2014;2:347–357. doi: 10.17122/ogbus-2014-2-347-367. EDN STGYBV.
14. Makarova IL, Ignatenko AM. Determination Coefficient for Nonlinear Regression. *Journal: Eurasian Scientific Association*, 2018;3:161–163.
15. Chicco D, Warrens J, Jurman G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *Peer J Computer Science* 7, 2021. doi:10.7717/peerj-cs.623.
16. A. Alzakkar, Application of Artificial Neural Networks to Evaluate Stability of Voltage of Electric Power Systems in Syria, *The international technical-economic journal*. 2020; 1:87-95. doi: 10.34286/1995-4646-2020-70-1-87-95.
17. YI. Soluyanov, AI. Fedotov, YYa. Galitsky, NV. Chernova, Azat R. AKHMETSHIN. Updating the Standard Specific Electric Loads of Apartment Buildings in the Republic of Tatarstan. *Journal: Elektrichestvo*, 2021;6:62–71. doi: 10.24160/0013-5380-2021-6-62-71.

18. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, et al. Analysis of the actual electrical loads of public premises embedded in residential buildings. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(6):134-147. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-6-134-147.

19. R. Zanella, C. Nore, X. Mininger, et al. Numerical Study of Cooling by Ferrofluids in an Electrical Transformer Using an Axisymmetric Model, *IEEE Transactions on Magnetics*. vol.57 Issue.7, 2021. doi: 10.1109/TMAG.2021.3066412.

20. M. Daghray, Z. Wang, Q. Liu. Experimental Study of the Influence of Different Liquids on the Transformer Cooling Performance. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2019;34(2). doi: 10.1109/TPWRD.2019.2895533.

Authors of the publication

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University.

Ahmad A. Alzakkar –Kazan State Power Engineering University.

Stanimir Valtchev – Associate Professor of University NOVA of Lisbon, Portugal.

Шифр научной специальности:

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Смежные специальности в рамках группы научной специальности

2.4.3.Электроэнергетика

Получено

21.03.2023г.

Отредактировано

06.04.2023г.

Принято

12.04.2023г.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА



УДК 621.311

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-2-97-109

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ ТРАНСФОРМАТОРОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Левин В.М.¹, Петушков П.А.², Швец М.А.¹

¹Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

²ООО «КОТЭС Инжиниринг», г. Новосибирск, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0880-3989>, levin@power.nstu.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ:** Одним из важнейших ожидаемых эффектов цифровизации объектов электросетевого комплекса РФ является повышение уровня надежности его функционирования. В этой связи исследования и разработки в указанном направлении несомненно актуальны. **ЦЕЛЬ:** Предложить математическую модель для мониторинга опасных развивающихся дефектов в силовых маслонаполненных трансформаторах, отвечающую свойствам предиктивности и адаптивности. На базе модели реализовать алгоритм принятия решений по длительной надежной эксплуатации трансформаторов. **МЕТОДЫ:** При решении задач применяются методы статистической теории распознавания образов, корреляционного анализа и байесовской классификации, обеспечивающие высокую достоверность диагностических оценок, обоснованность и эффективность принимаемых эксплуатационных решений. **РЕЗУЛЬТАТЫ:** Получена и верифицирована предиктивная модель в виде корреляционной функции признака дефектного состояния трансформатора от значений его электрической нагрузки. Сформировано дерево событий, восстанавливающее причинно-следственные связи между результатом мониторинга трансформатора, признаком дефекта и принимаемым эксплуатационным решением. На основе дерева событий и критериев диагностической оценки реализован управляющий алгоритм, с помощью которого выполнены расчеты, подтверждающие эффективность предложенного подхода. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ:** Продемонстрирована возможность эффективного применения разработанной модели распознавания дефектов и управляющего эксплуатационного алгоритма в качестве инструментов технологии промышленного интернета вещей, в частности при организации дистанционного диагностического мониторинга маслонаполненного трансформаторного оборудования на подстанциях района распределительной электрической сети.

Ключевые слова: трансформатор; диагностический мониторинг; предиктивная математическая модель; байесовская классификация; распознавание дефектов; эксплуатационные воздействия; алгоритм принятия решений.

Для цитирования: Левин В.М., Петушков П.А., Швец М.А. Дистанционный мониторинг и управление состоянием трансформаторов в распределительных электрических сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 97-109. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-97-109.

REMOTE MONITORING AND CONTROL OF THE STATUS OF TRANSFORMERS IN DISTRIBUTION ELECTRICAL NETWORKS

VM. Levin¹, PA. Petushkov², MA. Shvets¹

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

²KOTES Engineering LLC, Novosibirsk, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0880-3989>, levin@power.nstu.ru

Abstract: **RELEVANCE:** One of the most important expected effects of digitalization of objects of

the power grid complex of the Russian Federation is to increase the level of reliability of its functioning. In this regard, research and development in this direction is undoubtedly relevant. **THE PURPOSE.** To propose a mathematical model for monitoring dangerous developing defects in power oil-filled transformers, this would meet the properties of predictability and adaptability. Based on the model, to develop a decision-making algorithm for long-term reliable operation of transformers. **METHODS:** Methods of statistical pattern recognition theory, correlation analysis and Bayesian classification will be used to solve the problems to ensure high reliability of diagnostic assessments, validity and effectiveness of operational solutions. **RESULTS:** A predictive model was obtained and verified in the form of a correlation function of a sign of a faulty state of a transformer from the values of its electrical load. An event tree has been formed that restores the causal relationship between the result of monitoring the transformer, the defect sign and the operational decision being made. Based on the event tree and diagnostic evaluation criteria, a control algorithm is implemented, with the help of which calculations are performed confirming the effectiveness of the proposed approach. **CONCLUSION:** The possibility of effective application of the developed defect recognition model and operational control algorithm as tools of industrial technology of the Internet of Things is illustrated, in particular, when organizing remote diagnostic monitoring of oil-filled transformer equipment at substations of the distribution grid area.

Keywords: transformer; diagnostic monitoring; predictive mathematical model; Bayesian classification; defect recognition; operational impacts; decision-making algorithm.

For citation: Levin VM, Petushkov PA, Shvets MA. Remote monitoring and control of the status of transformers in distribution electrical networks. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(2): 97-109. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-97-109.

Введение (Introduction)

Методы неразрушающего контроля и технического диагностирования (мониторинга) электрооборудования сегодня являются наименее затратными, поскольку их применение, как показывает опыт ряда крупных энергокомпаний России, напрямую способствует снижению количества отказов и аварий на объектах электроэнергетики [1,2]. Силовые трансформаторы напряжением 35–220 кВ представляют наиболее массовое и критически важное оборудование, находящееся в эксплуатации на объектах электроэнергетических систем (электростанций и электрических сетей). Стоимость риска отказов такого оборудования во много раз превосходит затраты на его техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) [3]. Это определяет необходимость раннего выявления приводящих к отказу развивающихся дефектов и их своевременного устранения введением адекватных корректирующих воздействий [4,5]. ТОиР силовых трансформаторов осуществляется в соответствии со стратегией «по техническому состоянию», что обеспечивается применением комплекса методов контроля и технического диагностирования¹. Одним из основных и наиболее информативных методов раннего обнаружения дефектов в силовых маслонаполненных трансформаторах (СМТ) является анализ газов, растворенных в минеральном трансформаторном масле (АРГ)² [6]. Выявление дефектов по протоколам АРГ осуществляется на основе измеренных концентраций семи диагностических газов: водорода – H_2 , метана – CH_4 , этана – C_2H_6 , этилена – C_2H_4 и ацетилена – C_2H_2 , оксида – CO и диоксида – CO_2 углерода. При этом измерения производятся в рабочем режиме СМТ под напряжением без отключения нагрузки, что гарантирует адекватность получаемой информации протекающим в трансформаторе физическим процессам. Таким образом, широкое применение АРГ для задач мониторинга и диагностирования СМТ по-прежнему актуально и безальтернативно.

Главной задачей on-line мониторинга СМТ, как показывают результаты многочисленных исследований [7,8], является наблюдение динамики изменения контролируемых параметров состояния с возможностью выделения трендов и прогнозирования развития ситуации, а в случае достижения (превышения) одним из

¹ СТО 34.01-23.1-001-2017 Объем и нормы испытаний электрооборудования. Стандарт организации ПАО «Россети» М.: ПАО «Россети», 2017. Доступно по: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293734154.pdf>. Ссылка активна на 17 февраля 2023.

² СТО 34.01-23-003-2019 Методические указания по техническому диагностированию развивающихся дефектов маслонаполненного высоковольтного электрооборудования по результатам анализа газов, растворенных в минеральном трансформаторном масле. Стандарт организации ПАО «Россети» М.: ПАО «Россети», 2019. Доступно по: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293730/4293730029.htm>. Ссылка активна на 17 февраля 2023.

параметров установленного предельно-допустимого значения фиксации признака неисправности и формирования сигнала тревоги «Alarm». В дополнение к этому задачи *off-line* диагностирования СМТ включают: определение вида и характера неисправности, выявления причин ее возникновения и степени опасности для дальнейшей эксплуатации оборудования, а также формирование представительной диагностической статистики.

Дистанционным называют мониторинг, при котором наблюдаемые объекты и датчики контроля параметров состояния распределены по территории на расстоянии различного удаления от центра принятия решений, где сосредоточены аппаратура приема и обработки информации, базы данных и правил, серверы со специализированным программным обеспечением. В этом случае передача данных осуществляется на расстояние по защищенным каналам связи, что, несомненно, повышает требования к информационной безопасности [9-11].

В статье авторы демонстрируют, что для решения задач дистанционного мониторинга СМТ целесообразно применение комбинированной информации, организованной по принципу «информативность контроля – адекватность моделей – достоверность оценок – эффективность эксплуатации» [12].

Одной из сфер успешного применения предлагаемого подхода в перспективе служит технология дистанционного мониторинга группы трансформаторов одинакового класса напряжения, эксплуатируемых на подстанциях района распределительной электрической сети. Развитие потенциала технологии дистанционного мониторинга СМТ, как одной из технологий промышленного интернета вещей (*IIoT*), подчеркивает ее актуальность и формирует перспективы широкого практического применения [13-16]. Статья не затрагивает многочисленных технологических аспектов построения системы дистанционного мониторинга, а лишь раскрывает вопросы диагностической эффективности математических моделей классификации состояний СМТ на основе байесовских преобразований, а также особенности их алгоритмической реализации.

Материалы и методы исследования

Использование комбинированных данных *on-line* мониторинга и *off-line* диагностирования группы СМТ одинакового класса напряжения с сопоставимыми условиями эксплуатации, дополненных историческими сведениями, и формированием ретроспективы многолетних наблюдений представляет собой информационное ядро разрабатываемой системы дистанционного мониторинга (СДМ) трансформаторного оборудования [17].

Математической основой СДМ служит метод статистической байесовской классификации дефектов в СМТ на основе протоколов АРГ [18,19]. Применение нелинейной свертки F диагностических признаков (концентраций контролируемых газов)

$$F = \sum_{i=1}^7 \frac{a_i^2}{\sum_{i=1}^7 a_i}, \quad (1)$$

где: $a_i = \frac{A_i}{A_{igr}}$ – относительная концентрация i -го газа; A_i, A_{igr} – измеренное и предельно-

допустимое значения абсолютной концентрации i -го газа (%об. или *ppm*) обеспечивает редукцию размерности пространства первичных признаков, нормальность распределения случайной величины F (нового, обобщенного признака) и линейную разделимость классов состояний СМТ.

Исходная дихотомия классов состояний Π_1 – «норма» и Π_2 – «отклонения от нормы» формируется в процессе предварительного обучения на выборке протоколов АРГ группы СМТ с применением критерия «граничных концентраций», согласно которому: если $a_i \leq 1$ ($i = 1..7$), то класс состояний Π_1 ; если $a_i > 1$, то класс состояний Π_2 .

Это обеспечивает идентификацию признака развивающегося в трансформаторе дефекта. Достоверность решений зависит от вида классификатора, используемого для описания границы раздела классов состояний. В рассматриваемых условиях высокую (не менее 97%) достоверность обеспечивает применение байесовского классификатора на основе отношения правдоподобия [18]:

$$L = -\ln p(F/\Pi_1) + \ln p(F/\Pi_2) - \ln \left(\frac{P(\Pi_1)}{P(\Pi_2)} \right). \quad (2)$$

Здесь: $p(F/\Pi_j)$ – плотности распределения условных вероятностей признака F в каждом j -

м классе состояний ($j=1,2$); $P(\Pi_j)$ – априорная вероятность принадлежности трансформатора к j -му классу состояний; $P(\Pi_1)/P(\Pi_2)$ – отношение правдоподобия. Преобразование (2) к канонической квадратичной форме с определением корней уравнения позволяет получить строгое аналитическое решение для границы раздела классов состояний Π_1 и Π_2 :

$$F_{\text{гр}} = \frac{M_1 \cdot \sigma_2^2 - M_2 \cdot \sigma_1^2 + \sqrt{D}}{\sigma_2^2 - \sigma_1^2}, \quad (3)$$

где M_j, σ_j – математические ожидания и среднеквадратические отклонения распределений варианты F в классах состояний Π_1 и Π_2 соответственно; D – функция указанных числовых характеристик. Достаточным условием для применения (3) в расчетах точного значения $F_{\text{гр}}$ является принадлежность варианты F нормальному закону распределения. Однако, как показали исследования [18], при любом виде квазинормального распределения $p(F/\Pi_j)$ в соответствии с правилом «трех сигм» удастся найти приближенное значение $\tilde{F}_{\text{гр}}$, удовлетворяющее необходимым требованиям:

$$\tilde{F}_{\text{гр}} = M_1 + k\sigma_1. \quad (4)$$

С учетом (3) либо (4) критерий распознавания классов состояний СМТ будет иметь вид: если $F \leq \tilde{F}_{\text{гр}}$, то класс состояний Π_1 ; если $F > \tilde{F}_{\text{гр}}$, то класс состояний Π_2 .

Выражение (4) обладает рядом полезных адаптационных свойств, позволяющих минимизировать суммарную ошибку распознавания $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$. Первое свойство возникает при изменении эмпирической константы k в интервале значений (2..3). В результате удастся существенно повысить достоверность диагностических оценок даже при вариации исходного количества и состава контролируемых признаков [19].

Другое адаптационное свойство границы раздела классов состояний $\tilde{F}_{\text{гр}}$, возникает при формировании зависимости $\tilde{F}_{\text{гр}}$ от коэффициента загрузки СМТ $K_{\text{загр}} = I_{\text{нагр}}/I_{\text{ном}}$, которая моделируется нелинейной корреляционной функцией:

$$\tilde{F}_{\text{гр}}(K_{\text{загр}}) = M_1(K_{\text{загр}}) + k\sigma_1(K_{\text{загр}}). \quad (5)$$

Здесь $I_{\text{нагр}}, I_{\text{ном}}$ (А) – токовая нагрузка и номинальное значение тока в обмотке низкого (низкого и среднего) напряжения СМТ в момент взятия пробы масла на АРГ.

Необходимость учета зависимости (5) при выполнении диагностических оценок имеет определенный физический смысл, так как увеличения токов нагрузки в обмотках СМТ приводят к дополнительным нагревам элементов активной части (магнитопровода, обмоток, изоляции) и соответствующим увеличениям концентраций диагностических газов. Поскольку подобный эффект наблюдается у трансформаторов как в состоянии «норма», так и в состоянии «отклонение от нормы», важно исключить фактор повышения нагрузки СМТ при распознавании класса его технического состояния. Получение корреляционных функций $M_1(K_{\text{загр}})$ и $\sigma_1(K_{\text{загр}})$ производится в следующей последовательности:

1) по ретроспективе протоколов АРГ в классе состояний Π_1 "норма" формируются выборки вариант F и $K_{\text{загр}}$, согласованные по дате и времени отбора проб масла из баков СМТ;

2) определяется интервал изменения $K_{\text{загр}}$ в соответствующей выборке $[K_{\text{загр}}^{\min} \div K_{\text{загр}}^{\max}]$, который разделяется на $m \leq 10$ равных интервалов $\Delta K_{\text{загр}}$;

3) для каждого i -го интервала $\Delta K_{\text{загр}}$ составляются цензурированные выборки варианты F , для каждой из которых определяются M_{1i} и σ_{1i} ($i = 1..m$);

4) m опытных точек M_{1i} и σ_{1i} помещаются на плоскости в координатах $M_1(K_{\text{загр}})$ и $\sigma_1(K_{\text{загр}})$, а затем по выражению (5) рассчитываются значения $\tilde{F}_{\text{гр}}(K_{\text{загр}i})$;

5) производится аппроксимация нелинейной корреляционной функции (5) выражением вида

$$\tilde{F}_{\text{гр}} = A \exp(BK_{\text{загр}}). \quad (6)$$

Экспоненциальная зависимость (6), где A, B – константы аппроксимации, представляется

наиболее предпочтительной для описания подобной функции. В дальнейшем именно выражение (6) будет рабочим инструментом для учета искомой зависимости в процессе идентификации состояний СМТ.

Ошибки распознавания текущих состояний СМТ с применением установленных критериев обусловлены некоторыми особенностями модели классификатора. Главным образом к этому приводит равновесное долевое участие относительных концентраций каждого из контролируемых газов в формировании интегральной функции (1). В реальности повышенные концентрации газов несут разную диагностическую информацию. Так, например, водород (H_2) и углеводородные газы (C_xH_y) служат ключевыми индикаторами типа развивающегося дефекта, в то время как оксиды углерода (CO и CO_2) представляют собой продукты жизнедеятельности органической изоляции и сопровождают любой СМТ в течение всего срока жизни [20-22]. Кроме этого, влияние указанного фактора отражается на значениях числовых характеристик случайной переменной F при определении границы раздела классов состояний Π_1 и Π_2 по выражениям (3) и (4).

С целью повышения достоверности оперативных оценок текущего состояния СМТ по протоколам АРГ в работе предусмотрена отстройка алгоритма классификации от событий, связанных с повышенными значениями концентраций CO и CO_2 , с одновременным определением вызвавших их причин. В качестве инструмента предложено использование дерева событий, по которому восстанавливаются скрытые причинно-следственные связи инициирующего и конечных событий, факт наступления которых подтверждают данные из истории эксплуатации конкретного СМТ.

Дерево событий является логической последовательностью взаимосвязанных событий [23,24], разветвленной произвольным образом в соответствии с потенциальными сценариями развития ситуации. На рисунке 1 показан один из примеров такой последовательности, где в качестве инициирующего события фигурирует "повышенный уровень концентраций CO и/или CO_2 в масле СМТ".

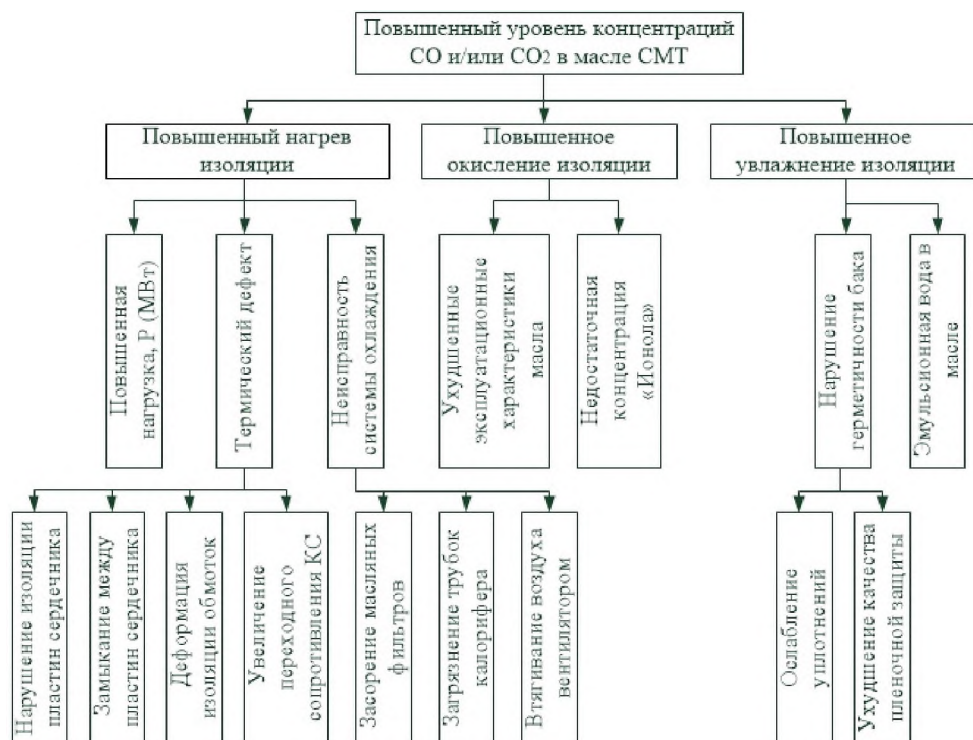


Рис. 1. Дерево событий для выявления причин аномально высоких концентраций CO , CO_2 в масле

Fig. 1. Event tree to identify the causes of abnormally high concentrations of CO , CO_2 in oil

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

При обнаружении нежелательного события в процессе классификации состояний с помощью дерева событий и сведений из истории эксплуатации конкретного СМТ по одному из сценариев устанавливается вызвавшая его причина. Далее формируется одно из возможных эксплуатационных решений по устранению этой причины с применением соответствующего корректирующего воздействия на трансформаторное оборудование. Алгоритм вычислений и принятия решений представлен на схеме (рис. 2).

Результаты и обсуждение

Для иллюстрации разработанного подхода рассмотрим в качестве примера группу однотипных СМТ 110/35/6 кВ в составе 16 единиц, эксплуатируемых на подстанциях распределительной электрической сети (рис. 3) одного из районов Западной Сибири. Ретроспектива АРГ трансформаторов глубиной 5 лет включает 326 протоколов, из которых в результате предварительной классификации по критерию «границных концентраций»² сформирована дихотомия классов Π_1 и Π_2 с выборками вариант F и $K_{\text{загр}}$ объемом 272 и 56 единиц соответственно. Статистический анализ выборок позволил определить числовые и интегральные характеристики условного распределения F для дихотомии классов, а также сформировать границу раздела в пространстве контролируемых параметров (рис. 4). На рис. 4а представлены гистограммы относительных частот условного распределения F в классах Π_1 и Π_2 . Из рисунка следует, что:

1) одномодальное двухпараметрическое распределение $p(F/\Pi_1)$ подчинено квазинормальному закону, что гарантирует корректность применения выражения (4) для описания границы раздела классов состояний;

2) распределение $p(F/\Pi_2)$ состоит из смеси нескольких квазинормальных распределений, что связано с проявлением дефектов разной тяжести у трансформаторов с длительными сроками эксплуатации.

Результат итоговой классификации с применением адаптивного решающего правила (5) показан на рис. 4в. Здесь круглыми и квадратными фигурами в координатах контролируемых параметров $F(K_{\text{загр}})$ изображены протоколы АРГ СМТ, отнесенные по разработанным критериям к классам Π_1 и Π_2 . При разделении дихотомии классов полученным решающим правилом $\tilde{F}_{\text{гр}} = 0,2819 \cdot \exp(2,1809 \cdot K_{\text{загр}})$ возникают ошибки первого (ϵ_1) и второго (ϵ_2) рода (на рисунке выделены красным цветом и подписями значений признака F).

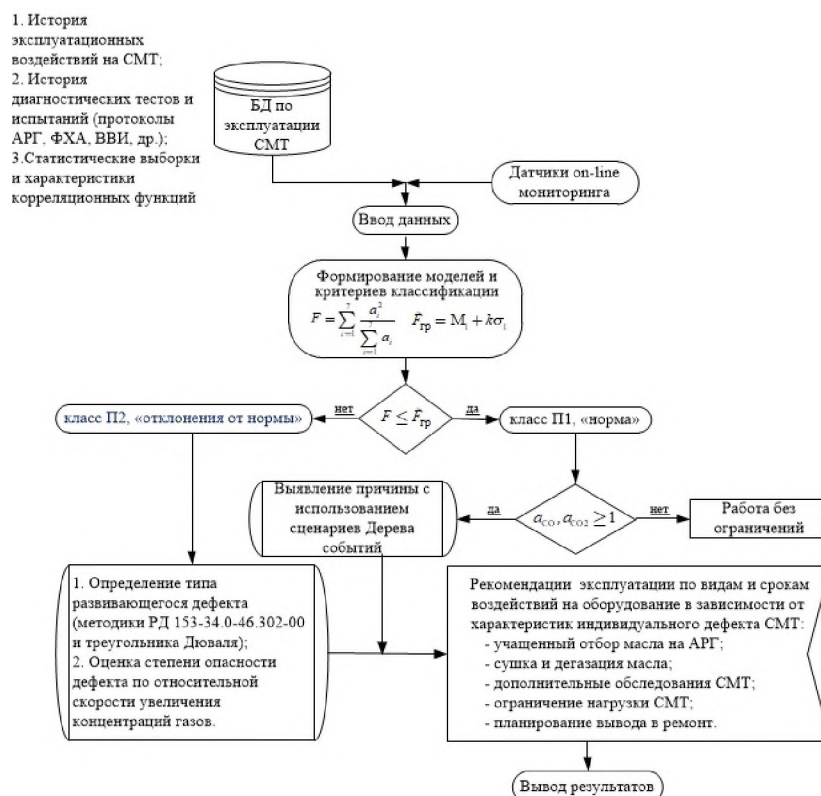


Рис. 2. Схема принятия решений для обеспечения надежной эксплуатации трансформаторов

Fig. 2. Decision-making scheme for transformers maintaining reliable operation

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

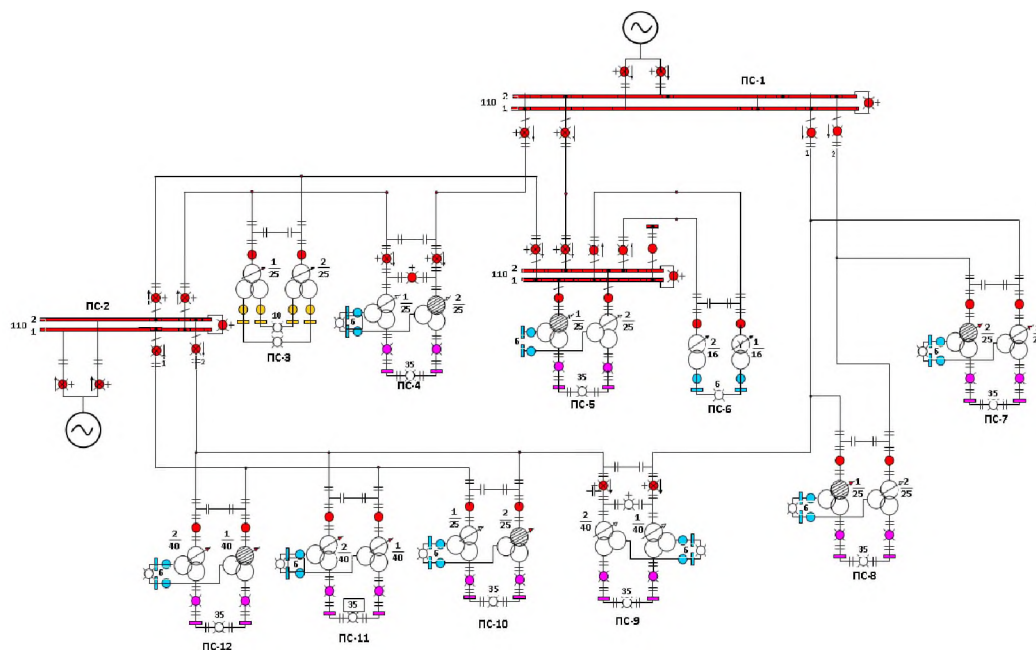


Рис. 3 – Подстанции исследуемого сетевого района Fig. 3 – Substations of the network area under study

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

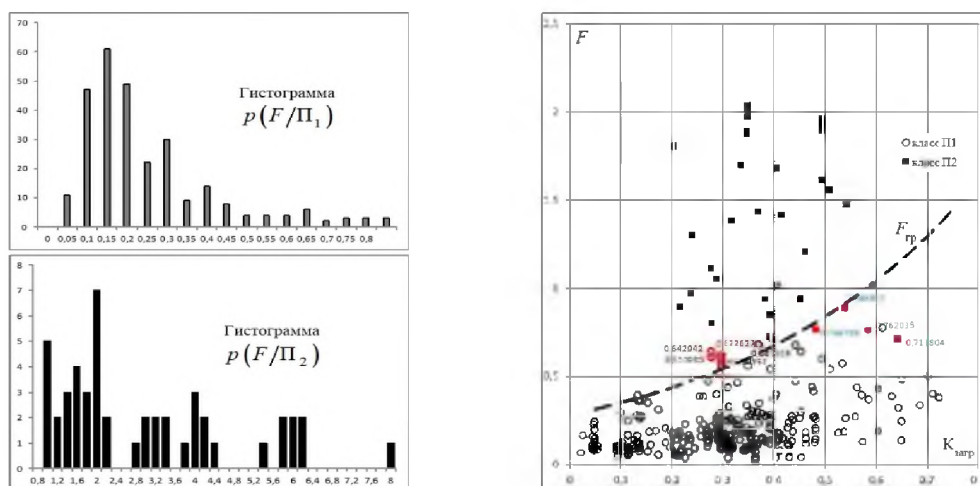


Рис. 4 – Характеристики статистической классификации

а) гистограммы относительных частот условного распределения F

a) histograms of relative frequencies of the conditional distribution F

Fig. 4 – Characteristics of statistical classification

б) адаптивная граница раздела классов в пространстве контролируемых параметров

b) adaptive class division boundary in the space of controlled parameters

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Анализ ошибок классификации необходим как условие для повышения достоверности предложенной модели и алгоритма. Величина ошибки ε_1 – «ложная тревога» (шесть протоколов) не превышает 2%, что вполне удовлетворяет практике применения. Ошибка ε_2 – «пропуск дефекта» (четыре протокола) составляет около 7%. В связи с более высокой опасностью она требует дополнительного внимания. В таблице 1 приведены относительные концентрации диагностических газов из протоколов АРГ, в том числе и ошибочно отнесенных к классу Π_2 (выделено курсивом).

Таблица 1
Table 1Ретроспектива протоколов АРГ СМТ, в том числе ошибочно отнесенных к классу П₂
Retrospective of DGA Oilfield PT protocols, including those erroneously classified as P2

Дата	a_{H_2}	a_{CH_4}	$a_{C_2H_4}$	$a_{C_2H_6}$	$a_{C_2H_2}$	a_{CO}	a_{CO_2}	F	$K_{заг}$
04.2005	0,4411	0,0266	0,1072	0,0384	0,0061	0,2453	1,1193	0,7668	0,4812
05.2005	0,2697	0,0348	0,1008	0,0388	0,0301	0,2288	1,0565	0,7133	0,3975
03.2006	0,6193	0,0382	0,1326	0,0441	0,0101	0,3898	1,0255	0,7118	0,6427
09.2006	2,0578	0,0704	0,1529	0,0702	0,0110	0,7999	1,2956	1,4778	0,5417
03.2007	0,4162	0,0403	0,1507	0,0442	0,0101	0,4154	1,3257	0,8865	0,5395
03.2008	0,5700	0,0329	0,1571	0,0448	0,0134	0,3302	1,1283	0,7620	0,5845
09.2008	1,7670	0,0375	0,1578	0,0407	0,0070	0,6944	1,9865	1,6156	0,4931
09.2008	2,3641	0,0322	0,1565	0,0427	0,0242	0,4995	2,0260	1,9379	0,4931
09.2008	2,4620	0,6818	0,0383	0,1637	0,0080	0,6818	2,0188	1,9627	0,4931
09.2008	2,5795	0,6628	0,0372	0,4343	0,0166	0,6628	1,5860	1,8956	0,4931
10.2008	1,8635	0,0362	0,1632	0,4204	0,0109	0,5363	1,4031	1,4199	0,4141
11.2008	0,9664	0,0305	0,1368	0,0371	0,0093	0,4161	1,3773	1,0148	0,4045
02.2009	0,3678	0,0266	0,1357	0,0397	0,0257	0,2872	1,0981	0,7295	0,3916
09.2009	1,9722	0,0539	0,1730	0,0541	0,0338	0,2935	1,1578	1,4321	0,3692
11.2009	1,2609	0,0378	0,1566	0,0409	0,0278	0,2368	0,9078	0,9362	0,3828

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Следует отметить, что все указанные протоколы принадлежат конкретному трансформатору 1Т ПС-6 (рис. 3). На протяжении рассматриваемого интервала эксплуатации в СМТ наблюдалось устойчивое превышение граничной концентрации диоксида углерода CO_2 при значениях CO_2/CO существенно превышающих 13. Это свидетельствует о монотонном старении бумажной изоляции трансформатора под воздействием неблагоприятных факторов. По данным таблицы 1 ряд протоколов АРГ за 2008–2009 годы содержит практически двукратное превышение граничной концентрации водорода H_2 . Совместно с превышением CO_2 это является индикатором протекания частичных разрядов в бумажной изоляции СМТ. Корневой причиной ошибочной классификации состояния 1Т ПС-6, которую удастся выявить с применением дерева событий (рис. 1), является периодически возникающие частичные разряды в бумаге. В таблице 2 приведены результаты интерпретации по критериям² одного из протоколов АРГ, относящихся к рассматриваемому трансформатору и интервалу наблюдения. По результатам в трансформаторе прогнозируется развивающийся дефект в виде ЧР низкой плотности, предположительно в заполненных газом полостях изоляции, образовавшихся вследствие не полной пропитки или увлажнения. В таблице 1 выделенные курсивом протоколы АРГ не принадлежат классу П₂, поскольку на моменты отбора проб масла в их изоляции отсутствуют условия для протекания разрядных процессов.

Таблица 2
Table 2Результаты интерпретации вида развивающегося дефекта по АРГ в 1Т ПС-6
Results of interpretation of the type of developing defect by DGA in 1T SS-6

H_2	0,02581	CH_4/H_2	C_2H_2/C_2H_4	C_2H_4/C_2H_6
CH_4	0,00037	0,143	0,006	0,765
C_2H_4	0,00166	< 0,1	< 0,1	≤ 1
C_2H_6	0,00217	прогнозируется частичные разряды с низкой плотностью энергии, затронута бумажная изоляция ($CO_2/CO > 13$).		
C_2H_2	0,00001			
CO_2	0,95164			
CO	0,03977			

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Таким образом, использование в алгоритме классификации логики дерева событий дает возможность полностью избежать ошибок второго рода. Визуальным подтверждением успешности проведенного анализа служит рисунок 5. Здесь показано изменение профиля обобщенного признака F , рассчитанного по (1) на основе данных протоколов АРГ 1Т ПС-6, по датам отбора проб масла, а также представлено изменение границы раздела классов

состояний $\bar{F}_{гр}$ в зависимости от фактических значений $K_{загр}$.

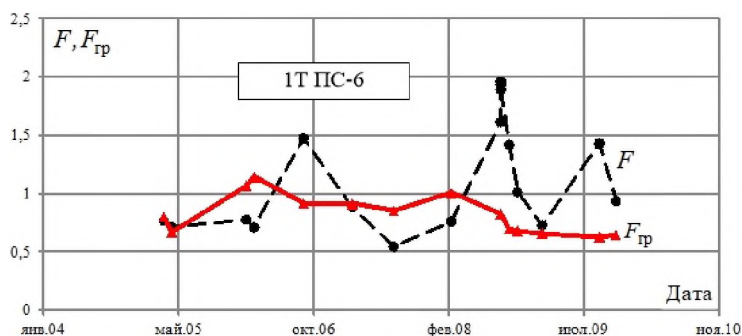


Рис. 5 Динамика изменений F и $\bar{F}_{гр}$ для 1Т ПС-6 по датам отбора проб масла на АРГ

Fig. 5. Dynamics of changes F and $\bar{F}_{гр}$ for 1T SS-6 by dates of oil sampling on DGA

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Для сравнения на рисунке 6 приведен другой характерный пример работы классификатора с отнесением состояний 1Т ПС-8 к классу Π_2 . Анализ профиля обобщенного признака F и изменений границы раздела классов $\bar{F}_{гр}$ на интервале наблюдения свидетельствует о наличии в трансформаторе "значительных отклонений от нормы".

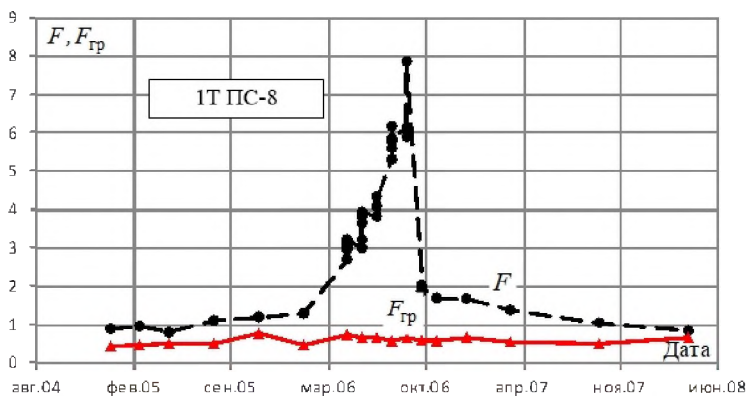


Рис. 6 Профиль F и $\bar{F}_{гр}$ для 1Т ПС-8 на интервале наблюдения

Fig. 6 Profile F and $\bar{F}_{гр}$ for 1T SS-8 at the observation interval

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Таблица 3 содержит результаты интерпретации дефекта по критериям², которые подтверждают превышение граничных концентраций газов CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 в масле, что соответствует наличию в СМТ высокотемпературного термического дефекта ($>600^\circ\text{C}$).

Таблица 3
Table 3

Результаты интерпретации вида развивающегося дефекта по АРГ в 1Т ПС-8
Results of interpretation of the type of developing defect by DGA in 1T SS-8

H_2	0,01359	CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$
CH_4	0,05832	4,29	0,005	4,93
C_2H_4	0,12035	> 1	$< 0,1$	> 3
C_2H_6	0,02439	прогнозируется термический дефект $> 600^\circ\text{C}$, затронута бумажная изоляция ($\text{CO}_2/\text{CO} < 5$).		
C_2H_2	0,00061			
CO_2	0,41294			
CO	0,04862			

Приведенные в статье примеры наглядно демонстрируют высокую согласованность модели классификации дефектов в исследуемых СМТ с алгоритмом принятия решений по

поддержанию надежного функционирования оборудования в процессе его эксплуатации.

Разработанный вычислительный инструментарий адекватен поставленной задаче организации дистанционного мониторинга трансформаторов на подстанциях района электрической сети с применением технологии промышленного интернета вещей. Технологические аспекты этой задачи представляют самостоятельное направление исследований и достойны специального рассмотрения.

Заключение

1. Цифровая трансформация объектов распределительных электрических сетей составляет актуальный стратегический приоритет развития отечественного электросетевого комплекса на ближайшую перспективу. Она открывает широкие возможности для использования современных информационных технологий с применением унифицированных протоколов данных, передовых алгоритмических решений, математических методов и процедур искусственного интеллекта. Одним из прорывных направлений в повышении надежности эксплуатации маслонаполненного трансформаторного оборудования на подстанциях распределительной электрической сети является автоматизация дистанционного диагностического мониторинга и распределенного управления эксплуатационным состоянием оборудования на основе технологии промышленного интернета вещей (*industrial internet of things technology*).

2. Центральное место при разработке системы диагностического мониторинга маслонаполненного трансформаторного оборудования принадлежит методам обработки данных, формирования признаков развивающихся дефектов, принятия решений по отнесению текущего состояния СМТ к одному из вероятных классов. В работе для этих целей использован эффективный и удобный метод статистической классификации дефектов в трансформаторах на основе АРГ и байесовских преобразований. Полученное правило принятия решений обладает рядом адаптационных свойств, которые позволяют учитывать влияние основных эксплуатационных факторов и существенно повысить достоверность практического применения. Одним из достоинств полученного статистического классификатора является возможность расширения функционала применяемых для оценки состояния трансформатора методов диагностического контроля с помощью формирования специальных корреляционных функций.

3. Разработанная алгоритмическая поддержка принятия решения включает не только этапы формирования математической модели классификатора на основе многолетней диагностической статистики СМТ и ее корректировки с учетом текущих измерений, а также этапы адаптации критерия распознавания состояния конкретного трансформатора к появлению нежелательного или сомнительного признака с применением логики дерева событий. Это обеспечивает надежную эксплуатацию СМТ, так как позволяет избежать ошибок классификации и одновременно выявить причину возникшего нежелательного события. Разработанный в статье подход иллюстрирован расчетным примером из реальной практики эксплуатации трансформаторов на подстанциях района распределительной электрической сети 110 кВ. Результаты исследования в полной мере подтверждают корректность исходной постановки задачи, а также адекватность примененных для этого методов решения.

Литература

1. Методы неразрушающего контроля. Доступно по: <https://ntcexpert.ru/953-metody-nerazrushayushchego-kontrolya>. Ссылка активна на 17 февраля 2023.
2. Орехов Э.А., Абрамов В.В. Методы неразрушающего контроля электротехнического оборудования // Энергоэксперт. 2020. № 2. С. 10–13.
3. Mehairjan R.P.Y., Zhuang Q., Djairam D. et al. High Voltage Technology & Asset Management. Delft University of Technology. Improved Risk Analysis Through Failure Mode Classification According to Occurrence Time. IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 23-27 September 2012, Bali, Indonesia. doi: 10.1109/CMD.2012.6416287.
4. Давиденко И.В., Халикова Е.Д. Учет рисков при выборе очередности мероприятий технического обслуживания силовых трансформаторов // ЭЛЕКТРО. 2014. № 6. С. 32–37.
5. Söderholm, P. and Norrbin, P. (2013), Risk-based dependability approach to maintenance performance measurement. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 19 No. 3, pp. 316-329. <https://doi.org/10.1108/JQME-05-2013-0023>.
6. Ashraf W.S., Singh R.A., Shiraz S., et. al. Advances in DGA based condition monitoring of transformers: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2021. vol. 149(C). doi: 10.1016/j.rser.2021.111347.

7. Mackenzie E.C., Crossey J., dePablo F., et. al. On-line monitoring and diagnostics for power transformers. 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. doi: 10.1109/ELINSL.2010.5549734.

8. Cheng X., Wang Y., The remote monitoring system of transformer fault based on The internet of Things, Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology, Harbin, 2011, pp. 84-87, doi: 10.1109/ICCSNT.2011.6181914.

9. Asadia F., Phumphob S., Pongswatd S. Remote monitoring and alert system of HV transformer based on FMEA. Energy Reports 6 (2020) 807–813. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.128>.

10. Mitra A., Dutta M., Pramanick A. Digitalization of Power Transformer Monitoring System, 2022 IEEE India Council International Subsections Conference (INDISCON), Bhubaneswar, India, 2022, pp. 1-5. doi: 10.1109/INDISCON54605.2022.9862843.

11. Захаров О.А. Цифровизация электросетевого комплекса: пути решения или система прогностики и мониторинга, Руководящие материалы по проектированию и эксплуатации электрических сетей, 2019, 3 (587). Доступно по: <https://prana-system.com/novosti/novosti/cifrovizaciya-elektrosetevogo-kompleksa-puti-resheniya-ili-sistema-prognostiki-i-monitoringa>. Ссылка активна на 17 февраля 2023.

12. Левин В.М., Яхья А.А. Цифровые модели предиктивной аналитики для удаленного мониторинга трансформаторного оборудования // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 72: Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровой трансформации. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2021. Кн. 1. С. 393 – 402.

13. Ховалова Т. В. Инновации в электроэнергетике: виды, классификация и эффекты внедрения // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2019. Т. 10. № 3. С. 274–283. doi: 10.17747/2618-947X-2019-3-274-283.

14. Папия Ю.С. Использование технологий интернета вещей в электроэнергетике: возможности и ограничения в процессе перехода // Научные записки молодых исследователей. 2019. № 5. С. 56–64.

15. Мозохин А.Е., Шведенко В.Н. Анализ направлений развития цифровизации отечественных и зарубежных энергетических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 4. С. 657–672. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-657-672.

16. Львов Ю.Н. Методология принятия решений при оценке технического состояния силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей с учётом фактора риска повреждения // Электрические станции, 2019, № 9. С. 14–20.

17. Левин В.М., Яхья А.А. Система информационно-аналитической поддержки принятия решений по эксплуатации силовых трансформаторов // Главный энергетик. 2020. № 9. С. 52–62.

18. Яхья А.А., Левин В.М. Байесовский классификатор как средство повышения эффективности распознавания дефектов в силовых трансформаторах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 6. С. 11–18. doi: 10.30724/1998-9903-2019-21-6-11-18.

19. Яхья А.А., Левин В.М. Адаптация предиктивной модели классификации дефектов в трансформаторах по количеству и составу контролируемых параметров. – Текст электронный // Борисовские чтения: материалы 3 Всерос. науч-техн. конф. с междунар. участием, Красноярск, СФУ, 2021. С. 192–196.

20. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло.– М.: Энергия, 1983. 296 с.

21. Кизеветтер Д.В., Савина А.Ю., Журавлева Н.М. и др. К вопросу о диагностике состояния трансформаторных масел в процессе эксплуатации // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. 3(178). С. 118–125.

22. Senoussaoui M.El-A., Fofana I., Brahmi M. Influence of Oil Quality on the Interpretation of Dissolved Gas Analysis Data. 2021 IEEE 5th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), Kozhikode, India. 2021. pp. 170-175. doi: 10.1109/CATCON52335.2021.9670513.

23. Берман А.Ф., Павлов Н.Ю., Николайчук О.А. Метод синтеза и анализа деревьев отказов на основе понятий механизма и кинетики событий // Проблемы анализа риска. 2018. Т. 15. № 3. С. 62–77.

24. Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных и машинное обучение на STATISTICA. – М.: Научно-техническое издательство Горячая линия – Телеком. 2018. 354 с.

Авторы публикации

Левин Владимир Михайлович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета.

Петушков Петр Александрович – главный специалист ООО "КОТЭС Инжиниринг", г. Новосибирск.

Швец Максим Александрович – магистрант, Новосибирского государственного технического университета.

References

1. Metody nerazrushayushchego kontrolya. Available at: <https://ntcexpert.ru/953-metody-nerazrushayushchego-kontrolya>. Accessed: 17 Feb. 2023.
2. Orekhov EA, Abramov VV. Metody nerazrushayushchego kontrolya elektrotekhnicheskogo oborudovaniya. *Energoekspert*. 2020; 2: 10–33.
3. Mehairjan RPY, Zhuang Q, Djairam D. et al. High Voltage Technology & Asset Management. Delft University of Technology. Improved Risk Analysis Through Failure Mode Classification According to Occurrence Time. *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. 23-27 September 2012, Bali, Indonesia. doi: 10.1109/CMD.2012.6416287.
4. Davidenko IV, Halikova ED. Uchet riskov pri vybore ocherednosti meropriyatij tekhnicheskogo obsluzhivaniya silovyh transformatorov. *ELEKTRO*. 2014. 6. pp. 32–37.
5. Söderholm, P. and Norrbin, P. (2013), Risk-based dependability approach to maintenance performance measurement. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. vol. 19. 3. pp. 316–329. <https://doi.org/10.1108/JQME-05-2013-0023>.
6. Ashraf WS, Singh RA., Shiraz S., et. al. Advances in DGA based condition monitoring of transformers: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier. 2021. vol. 149 (C). doi: 10.1016/j.rser.2021.111347.
7. Mackenzie EC, Crossey J, dePablo F, et. al. On-line monitoring and diagnostics for power transformers. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. 2010. pp. 1–5. doi: 10.1109/ELINSL.2010.5549734.
8. Cheng X, Wang Y. The remote monitoring system of transformer fault based on The internet of Things. *Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology*. Harbin. 2011. pp. 84–87. doi: 10.1109/ICCSNT.2011.6181914.
9. Asadia F, Phumphob S, Pongswatd S. Remote monitoring and alert system of HV transformer based on FMEA. *Energy Reports* 6 (2020) 807–813. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.128>.
10. Mitra A, Dutta M, Pramanick A. Digitalization of Power Transformer Monitoring System. *IEEE India Council International Subsections Conference (INDISCON)*. Bhubaneswar, India, 2022. pp. 1–5. doi: 10.1109/INDISCON54605.2022.9862843.
11. Zaharov OA. Cifrovizaciya elektrossetevogo kompleksa: puti resheniya ili sistema prognostiki i monitoringa, *Rukovodyashchie materialy po proektirovaniyu i ekspluatatsii elektricheskikh setej*, 2019, 3 (587). Available at: <https://prana-system.com/novosti/novosti/cifrovizaciya-elektrossetevogo-kompleksa-puti-resheniya-ili-sistema-prognostiki-i-monitoringa>. Accessed: 17 Feb. 2023.
12. Levin VM, Yah'ya AA. Cifrovye modeli prediktivnoj analitiki dlya udalennogo monitoringa transformatornogo oborudovaniya. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki: Nadezhnost' energosnabzheniya potrebitel' v usloviyah ih cifrovoy transformatsii*. – Irkutsk: ISEM SO RAN, 2021;72(1):393–402.
13. Khovalova T.V., 2019. Innovations in the Electric Power Industry: Types, Classification and Effects of Implementation, *Strategic decisions and risk management*, Real Economy Publishing House. 2019;3:274–283. doi: 10.17747/2618-947X-2019-3-274-283.
14. Papiya YU.S. Ispol'zovanie tekhnologij interneta veshchej v elektroenergetike: vozmozhnosti i ogranicheniya v processe perekhoda. *Nauchnye zapiski molodyh issledovatelej*. 2019;5:56–64.
15. Mozohin A.E., SHvedenko V.N. Analiz napravlenij razvitiya cifrovizatsii otechestvennyh i zarubezhnyh energeticheskikh sistem. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*. 2019;19(4):657–672. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-657-672.
16. L'vov YU.N. Metodologiya prinyatiya reshenij pri ocenke tekhnicheskogo sostoyaniya silovyh transformatorov i avtotransformatorov elektricheskikh setej s uchyotom faktora riska

povrezhdeniya. Elektricheskie stancii. 2019;9:14–20.

17. Levin VM, Yah'ya AA. Sistema informacionno-analiticheskoy podderzhki prinyatiya reshenij po ekspluatatsii silovyh transformatorov. *Glavnyj energetik*. 2020. 9. pp. 52–62.

18. Yah'ya AA, Levin VM. Bayesian Classifier is the Tool of Increasing the Efficiency of Defects Recognition in Power Transformers. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2018; 20(9-10):71-78. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-6-11-18>.

19. Yah'ya AA, Levin VM. *Adaptatsiya prediktivnoj modeli klassifikatsii defektov v transformatorah po kolichestvu i sostavu kontroliruemym parametrov*. Borisovskie chteniya: materialy 3 Vseros. nauch-tekh. konf. s mezhdunar. uchastiem, Krasnoyarsk. SFU. 2021. pp. 192–196.

20. Lipshtejn RA, SHahnovich MI. Transformatornoe maslo. M.: Energiya, 1983. 296 p.

21. Kizevetter DV, Savina AYU, ZHuravleva NM. et al. K voprosu o diagnostike sostoyaniya transformatornyh masel v processe ekspluatatsii. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013;3(178):118–125.

22. Senoussaoui M.E, Fofana I, Brahami M. Influence of Oil Quality on the Interpretation of Dissolved Gas Analysis Data. *2021 IEEE 5th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*, Kozhikode, India. 2021. pp. 170-175. doi: 10.1109/CATCON52335.2021.9670513.

23. Berman AF., Pavlov NYU, Nikolajchuk OA. Metod sinteza i analiza derev'ev otkazov na osnove ponyatij mekhanizma i kinetiki sobytij. *Problemy analiza riska*. 2018;15(3):62–77.

24. Borovikov V.P. *Populyarnoe vvedenie v sovremennyj analiz dannyh i mashinnoe obuchenie na STATISTICA*. M.: Nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo Goryachaya liniya – Telekom. 2018. 354 p.

Authors of the publication

Vladimir M. Levin –Novosibirsk State Technical University.

Pyotr A. Petushkov –KOTES Engineering LLC, Novosibirsk.

Maxim A. Shvets – Novosibirsk State Technical University.

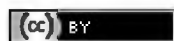
Шифр научной специальности:

2.4.3. Электроэнергетика

Получено 21.03.2023г.

Отредактировано 27.03.2023г.

Принято 03.04.2023г.



ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ФУНКЦИЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Мустафин Р.Г., Касимов В.А.

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2316-2278>, vasilkasimov@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. В настоящее время, наряду с первоначальной областью применения технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ), связанной с системами мониторинга переходных режимов (СМНР), все больше внимания уделяется расширению сферы применения указанной технологии. Цифровые подстанции (ЦПС) являются одним из мест генерации сигналов СВИ для СМНР, одновременно эти СВИ предлагается использовать для целей релейной защиты и автоматики на самой ЦПС, что облегчит построение централизованных систем релейных защит на ЦПС. ЦЕЛЬ. Рассмотреть вопросы применения технологии СВИ на ЦПС четвертого типа, в качестве замены сигналов Sampled Values (SV). Рассмотреть дополнения к стандартному набору сигналов СВИ, необходимые для работы различных релейных защит на цифровой подстанции. Выполнить анализ точности расчета СВИ при изменении частоты контролируемого тока и напряжения относительно номинального значения, при появлении в измеренном сигнале высших гармоник. Разработать методику предвычислений для алгоритмов релейной защиты. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялся метод расчета полной погрешности измерения СВИ TVE (Total Vector Error) – величина, характеризующая отклонение амплитуды и фазы измеренного вектора от их заданных значений. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, рассмотрены особенности работы ЦПС четвертого типа, необходимый набор сигналов СВИ для работы релейной защиты. Произведен расчет погрешности измерения СВИ при отклонении частоты сети от номинального значения, при наличии высших гармоник. В данной статье предложен метод предвычислений для алгоритмов релейной защиты. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование сигналов СВИ с необходимыми дополнениями для работы релейной защиты снижает нагрузку на цифровую сеть ЦПС, упрощает работу алгоритмов релейной защиты. Расчеты показали, что погрешности измерения СВИ не превышают нормативных значений. Предлагаемые методы предвычислений позволяют ускорить работу алгоритмов релейной защиты.

Ключевые слова: синхронизированные векторные измерения; СВИ; цифровая подстанция; ЦПС; Sampled Values; SV; TVE; релейная защита.

Для цитирования: Мустафин Р.Г., Касимов В.А. Применение технологии синхронизированных векторных измерений для выполнения функций релейной защиты // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 110-123. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-110-123.

USE OF SYNCHRONIZED VECTOR MEASUREMENTS TECHNOLOGY FOR PERFORM RELAY PROTECTION FUNCTIONS

RG. Mustafin, VA. Kasimov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
vasilkasimov@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2316-2278>, vasilkasimov@yandex.ru

Abstract: RELEVANCE. Recently, along with the initial scope of synchronized vector measurements (synchrophasor) technology associated with Wide Area Measurement System (WAMS), more and more attention is paid to expanding the scope of this technology. Digital

substations are one of the places for generating synchrophasor signals, at the same time, synchrophasor data are proposed to be used for the purposes of relay protection and automation at the digital substations itself, which will facilitate the construction of centralized relay protection systems at the substation. **THE PURPOSE.** Consider the use of synchrophasor technologies at a digital substation of the fourth type, as a replacement for Sampled Values (SV) signals. Consider additions to the standard set of synchrophasor signals necessary for the operation of various relay protections at a digital substation. Perform an analysis of the accuracy of calculating the synchrophasor when the frequency of the controlled current and voltage changes relative to the nominal value, when higher harmonics appear in the measured signal. Develop a pre-computation technique for relay protection algorithms. **METHODS.** When solving the problem, the method of calculating the total measurement error of the synchrophasor TVE (Total Vector Error) was used - a value that characterizes the deviation of the amplitude and phase of the measured vector from their specified values. **CONCLUSION.** The use of synchrophasor signals with the necessary additions for the operation of relay protection reduces the load on the digital network of the digital substation, simplifies the operation of relay protection algorithms. Calculations have shown that the measurement errors of synchrophasor do not go beyond the specified parameters. The proposed methods of precomputation allow to speed up the work of relay protection algorithms.

Keywords: synchronized vector measurements; digital substation; sampled values; SV; TVE; relay protection.

For citation: Mustafin RG, Kasimov VA. Use of synchronized vector measurements technology for perform relay protection functions. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(2): 110-123. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-110-123.

Введение (Introduction)

История техники РЗА насчитывает более сотни лет, но ее изменения и развитие продолжается весьма бурно. Первые электромеханические реле совмещали в себе все функции: измерение, сравнение с уставкой, исполнительный механизм. Микропроцессорные терминалы РЗА уже содержат лишь часть измерительных функций: высоковольтные измерительные трансформаторы выдают вторичный ток, напряжение, само измерение происходит в аналого-цифровом преобразователе (АЦП) терминала РЗА. В цифровой подстанции МЭК 61850 АЦП уже вынесено в *Merging Unit*, либо в оптический цифровой измерительный трансформатор, терминал РЗА полностью лишился аналоговой обработки сигнала, терминал РЗА содержит лишь программную часть. В результате появилась возможность собрать все программы всех терминалов РЗА в одном месте, в центральном сервере РЗА (ЦРЗА), сам сервер будет связан с цифровой сетью ЦПС оптическими кабелями *Ethernet* [1–3].

Вычислительную сложность для ЦРЗА создаёт дискретное преобразование Фурье (ДПФ), с помощью которого из измеренных точек тока или напряжения, определяется амплитуда первой и высших гармоник, необходимых для работы РЗА. Например, в одном присоединении измерены 4 тока (фазные токи I_A , I_B , I_C и ток нулевой последовательности I_0) и 4 напряжения (фазные напряжения U_A , U_B , U_C и напряжение нулевой последовательности U_0). Таким образом, для одного присоединения необходимо вычислить ДПФ восемь раз. Обычно на подстанции несколько контролируемых присоединений, и это создает пропорционально большую вычислительную сложность для ЦРЗА.

В последние годы появилась технология синхронизированных векторных измерений (СВИ) [4–6], и активно обсуждается применение СВИ в устройствах релейной защиты (РЗ), становясь в один ряд предлагаемых новых технических методов автоматизации и диагностики сетей [7–9]. Например, в [10, 11] рассматриваются вопросы совершенствования дистанционной защиты на основе технологии синхронизированных векторных измерений.

Применение СВИ в релейной защите решает проблему вычислительной сложности ДПФ для ЦРЗА, поскольку СВИ уже содержит в готовом виде амплитуду и фазу токов и напряжений: каждый пакет *Ethernet* СВИ содержит амплитуды фазных токов I_A , I_B , I_C и тока нулевой последовательности I_0 , амплитуды фазных напряжений U_A , U_B , U_C и напряжение нулевой последовательности U_0 , измеренное значение частоты для каждого из этих сигналов, и некоторые другие данные. Проблемой, которую необходимо

решить для успешного применения СВИ в релейной защите, является то, что измерения СВИ выполняются, считая частоту сигналов, равной номинальной частоте промышленной сети – 50 Гц, в то же время РЗА должны корректно работать при изменении частоты сети в пределах допустимых отклонений $\pm 10\%$ от номинальной частоты (45–55 Гц).

Кроме того, сигналы СВИ не содержат сведений о высших гармониках токов и напряжений, необходимых для работы алгоритмов релейной защиты. Чаще всего в РЗА используются вторая и третья гармоники, но и сумма амплитуд всех (вычисленных) высших гармоник также используется в РЗА.

Устройства измерения СВИ (УСВИ) на подстанции решает три задачи:

- передача СВИ на верхний диспетчерский уровень, для системы мониторинга переходных режимов (СМПР),
- измерения тока и напряжения для работы системы релейной защиты и автоматики подстанции,
- измерение тока и напряжения для счетчиков электроэнергии.

Каждая задача предъявляет свои требования к сигналам СВИ:

- СВИ для СМПР производит расчет параметров режима сети по основной, первой гармонике, таким образом, реальные токи и напряжения представляются чистой косинусоидой с заданной амплитудой, фазой и частотой $f_0=50$ Гц,

- Релейные защиты в основном используют составляющие тока и напряжения первой гармоники, для обнаружения переходных режимов используются высшие гармоники, при совместной работе подстанции с сигналами СВИ и обычной подстанции требуется максимальное приближение фазы СВИ к реальной фазе тока и напряжения, необходимая точность измерений токов и напряжений порядка 1%, точность измерения частоты порядка 0,01 Гц.

- Счетчики электроэнергии требуют измерения активной P и реактивной Q мощностей с более высокой точностью, порядка 0,2%.

Для токовых защит, для которых важна только амплитуда тока, без учета фазы, можно применить как амплитудное значение тока первой гармоники, так и действующее значение тока, так как именно действующее значение точно определяет нагрев оборудования от действия тока.

Дистанционная защита (ДЗ) по току и напряжению короткого замыкания определяет сопротивление петли короткого замыкания и по удельному сопротивлению линии определяет дальность до места короткого замыкания. В качестве удельного сопротивления рассматривается сопротивление прямой последовательности на частоте первой (основной) гармоники. При этом, если токи и напряжения прямой последовательности на первой гармонике образуют симметричную систему векторов со сдвигами фаз в 120° , то токи и напряжения третьей гармоники образуют параллельную систему векторов, то есть составляют нулевую последовательность. В результате, если для первой гармоники можно рассматривать удельное сопротивление прямой последовательности, то уже для третьей гармоники необходимо использовать сопротивление нулевой последовательности. Таким образом, для ДЗ должны использоваться только составляющие тока и напряжения на основной первой гармонике.

Для продольных дифференциальных защит линий электропередачи, например для дифференциально-фазной защиты (ДФЗ) или дифференциальной защиты линии (ДЗЛ), в которых напрямую используется фаза тока, необходимо в СВИ использовать фазу тока на основной первой гармонике. Если же использовать фазу тока на частоте 50 Гц, то в измерениях фазы появятся периодические колебания с периодом, определяющимся разностью частот рабочей f_p и номинальной $f_0 = 50$ Гц. Если с одной стороны ЛЭП будет установлена ДФЗ с использованием классического СВИ, а с другой стороны – обычная ДФЗ, то разность фаз СВИ и реального тока будет также периодически колебаться, что приведет к ложному срабатыванию защиты.

В соответствии с данными задачами предлагается дополнить алгоритм работы УСВИ на подстанции:

1. Формируются необходимые сигналы для СМПР по преобразованию Фурье с опорной частотой $f_0 = 50$ Гц, одновременно определяется рабочая основная (первая гармоника) частота токов и напряжений f_p .

2. Дополнительно формируются необходимые сигналы для РЗА с помощью преобразования Фурье с опорной частотой f_p , подсчитываются соответствующие амплитуды и фазы высших гармоник. Т.е. фактически работа, выполняемая терминалами РЗА, по обработке аналоговых сигналов переносится на УСВИ.

При использовании классических СВИ для РЗА в широком диапазоне частот (45-55 Гц) сигналов появляются ошибки измерения [12]. Для преодоления данной проблемы предлагаются различные алгоритмы. Несколько уменьшить ошибки при не номинальной частоте сигнала позволяет центрированное вычисление СВИ классического алгоритма с одним периодом и N выборками за период [13].

Основной эффект в уменьшении ошибки дает вычисление СВИ с измеренной частотой сигнала, которая, как правило, отлична от номинальной частоты. При этом возникает проблема с частотой дискретизации $f_{\text{дискр}} = 1/\Delta t = N \cdot f_0$, поскольку измерения тока или напряжения происходят в ожидании, что частота сигнала точно равна номинальной частоте 50 Гц. Для других частот сигналов возможен подсчет с другим количеством точек (другим N) за период и пересчет измеренных точек с интерполяцией и вычислением мгновенной амплитуды сигнала между двумя измеренными значениями [14–16].

В работе проведено комплексное исследование предложенных ранее идей [12-16], их применимости для получения синхронных векторных измерений, пригодных для целей релейной защиты и автоматики, получения необходимой точности вычисления СВИ при отклонении рабочей частоты токов и напряжений от номинальной 50 Гц при наличии в токах и напряжениях высших гармоник.

Для оценки применимости сигналов СВИ для задач РЗА в данной работе проведены стационарные тесты влияния на TVE изменения фазы и частоты сигнала, а также высших гармоник. Исследования проводились путем моделирования теоретического сигнала с последующим измерением СВИ и расчетом ошибок TVE определения СВИ. При этом оценивались следующие ошибки:

- 1) расчета СВИ на номинальной частоте при изменении начальной фазы и рабочей частоты;
- 2) расчета центрированного СВИ на номинальной частоте при изменении начальной фазы и рабочей частоты;
- 3) расчета центрированного СВИ на рабочей частоте при изменении начальной фазы, рабочей частоты и при наличии высших гармоник;
- 4) расчета активной, реактивной и вектора полной мощностей для первой гармоники и суммарного сигнала при изменении разности фаз между напряжением и током, рабочей частоты и при наличии высших гармоник.

Материалы и методы (Materials and methods)

В работе фазные напряжения и токи представляются в виде обобщенной функции:

$$X(t) = X_m \cos(2\pi f + \varphi), \quad (1)$$

где X_m — амплитуда сигнала, φ — начальная фаза.

Для оценки точности определения СВИ используется метрика TVE (Total vector error), вычисляемая как:

$$TVE = \sqrt{\frac{(\hat{X}_r - X_r)^2 + (\hat{X}_i - X_i)^2}{X_r^2 + X_i^2}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $\hat{X}$ — оценка СВИ, полученная в результате ДПФ, X — теоретический вектор.

Расчет СВИ по значениям SV осуществляется с помощью дискретного преобразования Фурье (3) и центрированного ДПФ (4):

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \exp\left(-j \frac{2\pi nk}{N}\right), \quad (3)$$

$$X(n) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} x(k) \exp\left(-j \frac{2\pi nk}{N}\right). \quad (4)$$

Для обоих вариантов ДПФ определяемая амплитуда сигнала одинакова, но изменяется начальная фаза, т.к. изменяется момент времени, для которого она определяется: в первом случае (3) для первой измеренной точки, а во втором (4) — для центральной точки.

Рассмотрим порядок Фурье преобразования на рабочей частоте f_p токов и напряжений, при постоянной частоте дискретизации АЦП УСВИ, настроенный на опорную частоту $f_0 = 50$ Гц. Пусть за период $T_0 = 1/f_0$ АЦП производит $N_0 = 80$

измерений токов и напряжений через интервал $\Delta t_0 = T_0/N_0$. Тогда для вычисления амплитуды сигнала на частоте f_p потребуется другой период интегрирования, отличный от T_0 . Это можно реализовать изменением числа точек в вычислении Фурье преобразования, но за счет дискретности числа точек N возможно только дискретно изменять период интегрирования и опорную частоту f (Табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Изменение опорной частоты f ДЦФ при изменении числа отсчетов N измеренного сигнала

Change of the reference frequency f DFF when the number of counts N of the measured signal changes

N	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
f , Гц	54,795	54,054	53,333	52,632	51,948	51,282	50,633	50	49,383	48,780	48,193	47,619	47,059	46,512	45,977	45,455	44,944

Для точной подстройки периода интегрирования и опорной частоты f Фурье преобразования под частоту f_p потребуется искусственно, математически изменить частоту дискретизации, путем линейной интерполяции мгновенных значений между двумя соседними измеренными АЦП точками. Рассмотрим алгоритмы подсчета новых мгновенных значений $x_{p,i}$, которые необходимы для Фурье преобразования с новой опорной частотой f_p :

- Выбирается ближайшее меньшее число точек N_p по ближайшей большей к f_p частоте из Табл.1, где возможный диапазон частот f_p ограничен рабочим интервалом УСВИ (45–55 Гц).

- Вычисляется необходимый шаг дискретизации:

$$\Delta t_p = 1/(f_p \cdot N_p) \quad (5)$$

- Находится центр среди N_p точек x_i , которыми могут быть исходные мгновенные значения токов и напряжений.

- Для нечетного количества N_p это центральная среди N_p точек $[x_{-(N_p-1)/2} \dots x_{(N_p-1)/2}]$ точка x_0 с индексом $i = 0$, измеренная в момент времени t_0 , и относительно t_0 пересчитывается мгновенное значение x_i в $x_{p,i}$. Тогда все амплитуды и фазы для РЗА будут рассчитываться относительно момента времени t_0 , когда была измерена точка x_0 :

$$x_{p,i} = (x_{i+1} - x_i) \cdot (\Delta t_p - \Delta t_0) \cdot i / \Delta t_0 + x_i. \quad (6)$$

- Для четного количества N_p центр среди N_p точек $[x_{-(N_p)/2} \dots x_{(N_p)/2}]$ находится между точками x_{-1} и x_0 , соответственно момент времени t_0 , относительно которого будут рассчитываться амплитуды и фазы, будет в центре между моментами измерения данных двух точек.

$$x_{p,i} = (x_{i+1} - x_i) \cdot (\Delta t_p - \Delta t_0) \cdot (i + 1/2) / \Delta t_0 + x_i. \quad (7)$$

- Получив передискретизированные точки $x_{p,i}$, которые соответствуют частоте f_p , по ним может быть определен вектор X СВИ для РЗА:

$$X = (\sqrt{2}/N_p) \sum_{i=-(N_p-1)/2}^{(N_p-1)/2} x_{p,i} \cdot \exp(-j2\pi f_p \Delta t_p i), \quad (8)$$

где j – мнимая единица.

- Для четных N_p вектор X СВИ для РЗА можно рассчитать, как:

$$X = (\sqrt{2}/N_p) \sum_{i=-N_p/2}^{(N_p/2-1)} x_{p,i} \cdot \exp(-j2\pi f_p \Delta t_p (i + 1/2)). \quad (9)$$

Результаты (Results)

Рассмотрим методику расчета TVE на примере сравнения теоретического сигнала с частотой, отличной от опорной (45 Гц), с рассчитанным с помощью ДПФ СВИ на частоте 50 Гц. На рисунке 1 представлены теоретический аналоговый сигнал, соответствующий ему дискретный сигнал, а также восстановленный сигнал СВИ.

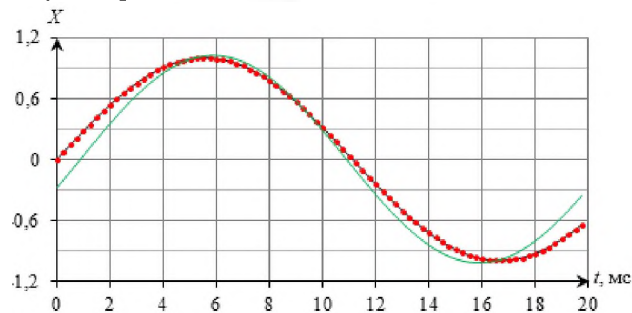


Рис. 1. Теоретический непрерывный сигнал (черная линия) с частотой 45 Гц, соответствующий ему дискретный сигнал (красные маркеры) и восстановленный сигнал с частотой $f_0 = 50$ Гц (зеленая линия), амплитуда и фаза которого определены с помощью ДПФ

Fig. 1. Theoretical continuous signal (black line) with a frequency of 45 Hz, corresponding to it a discrete signal (red markers) and a reduced signal with a frequency of $f_0 = 50$ Hz (green line), the amplitude and phase of which are determined by DPF

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Как следует из рисунка 1 амплитуды теоретического и восстановленного из СВИ, рассчитанного на частоте 50 Гц, сигнала примерно равны, но разность фаз этих сигналов для различных моментов времени не постоянна – для начального и конечного моментов времени разность существенна, а для момента времени близкого к центру периода измерения разность практически равна нулю. Это приводит к значительным ошибкам TVE. Результаты расчета TVE СВИ на номинальной частоте при вариации рабочей частоты и начальной фазы теоретического сигнала приведены на рисунке 2.

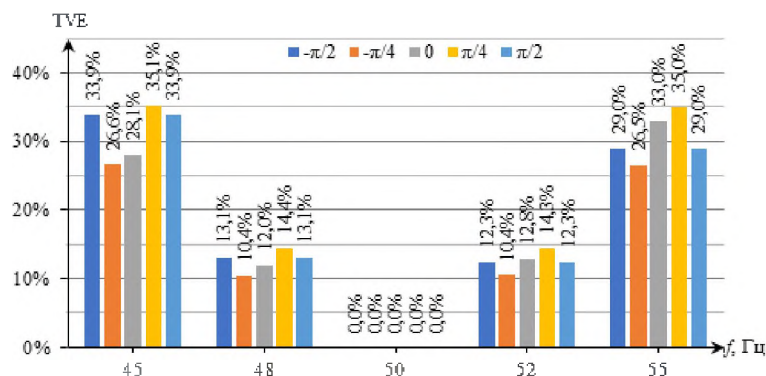


Рис. 2 Диаграмма TVE для различных частот и начальных фаз при расчете СВИ на частоте 50 Гц

Fig. 2 TVE diagram for different frequencies and initial phases when calculating PIS at 50 Hz

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

При номинальной частоте сигнала ошибка TVE определения СВИ по SV с помощью ДПФ не превосходит 10^{-6} % для любой начальной фазы. При максимально допустимых отклонениях частоты ошибки TVE достигают 35 %, что значительно превышает допустимые значения ошибок, т.е. полученные СВИ не могут применяться ни для учета мощности, ни для РЗА.

При частоте, отличной от номинальной, ошибки могут быть сокращены за счет определения фазы не для начального момента времени, а для времени центра окна измерения. Однако в связи с тем, что за период выполняется четное количество 80 дискретизаций сигнала, сигнал не может быть отцентрирован точно без интерполяции, поэтому выбирается один из близких к центру отсчетов 39 или 40-й. На рисунке 3 представлены вектора сигналов: теоретического с частотой 45 Гц и рассчитанного СВИ

на частоте 50 Гц.

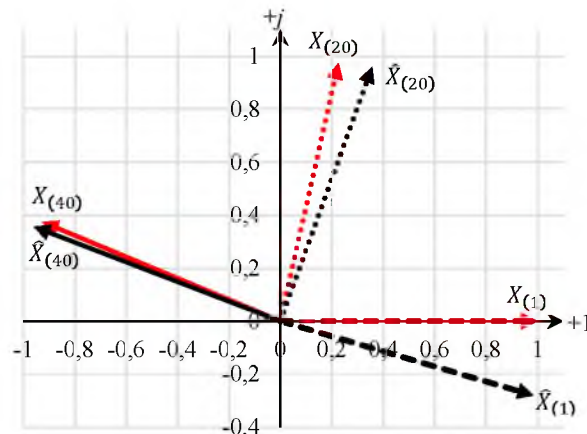


Рис. 3 Вектора теоретического сигнала X и рассчитанного СВІ $\hat{X}$ на частоте 50 Гц для моментов времени, соответствующих 1, 20 и 40-му отсчетам сигнала

Fig. 3 Vector of theoretical signal X and calculated SWI $\hat{X}$ at 50 Hz for points of time corresponding to the 1st, 20th and 40th signals

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Как видно на рисунке 3, при восстановлении вектора для начального момента времени восстановленный вектор отстает от теоретического на угол более 15 градусов. Для момента времени, соответствующего 20 отсчету сигнала, отставание вектора сокращается примерно до 5 градусов. И для центрального момента времени, соответствующего 40 отсчету сигнала, восстановленный вектор начинает опережать теоретический и отклонение составляет примерно 1 градус. Для последующих моментов времени угол опережения продолжает увеличиваться. В векторном представлении данная закономерность может быть объяснена тем, что угловые скорости теоретического вектора и восстановленного СВІ отличаются и пропорциональны их частотам.

На рисунке 4 представлены ошибки TVE для различных частот и начальных фаз при расчете СВІ на частоте 50 Гц для центрального отсчета времени.

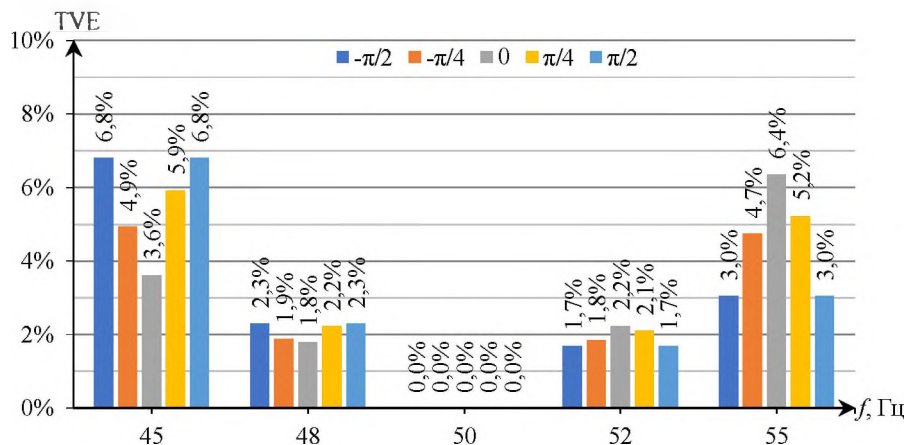


Рис. 4 Диаграмма TVE для различных частот и начальных фаз при расчете СВІ на частоте 50 Гц для центрального отсчета времени

Fig. 4 TVE diagram for different frequencies and initial phases PIS at 50 Hz for central time reference

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Как видно из рисунка 4, определение параметров (амплитуды и фазы) сигнала не для начального момента времени, а для центрального отсчета времени позволяет сократить ошибки TVE до 7% и менее. Однако данные ошибки все еще не допустимы для задач учета мощности и РЗА.

Таким образом, при выполнении расчета СВІ на номинальной частоте не удастся добиться необходимой точности при допустимых отклонениях частоты от номинальной, а значит необходимо учитывать изменение частоты сигнала при расчете СВІ.

СВИ на рабочей частоте

Расчет СВИ (амплитуды и фазы) осуществляется с помощью ДПФ, при этом частоты спектральных составляющих сигнала определяются частотой дискретизации и количеством отсчетов $f = f_{\text{дискр}} / (1..N/2)$, а их периоды должны быть кратны периоду дискретизации $T = (2..N) \cdot T_{\text{дискр}}$. В связи с этим для определения параметров сигналов на рабочей частоте можно либо изменять количество анализируемых отсчетов сигнала, либо изменять частоту дискретизации, либо изменять оба параметра.

В первом варианте изменение числа отсчетов может производиться дискретно только на целое количество, соответственно частота первой гармоники будет меняться также дискретно. При этом максимальная ошибка определения частоты составит $\pm 0,37$ Гц при рабочей частоте 54,4245 Гц (табл. 1). На рисунке 5 представлены максимальные ошибки TVE СВИ (для первого варианта) при вариации начальных фаз теоретического сигнала для различных рабочих частот от 45 до 55 Гц.

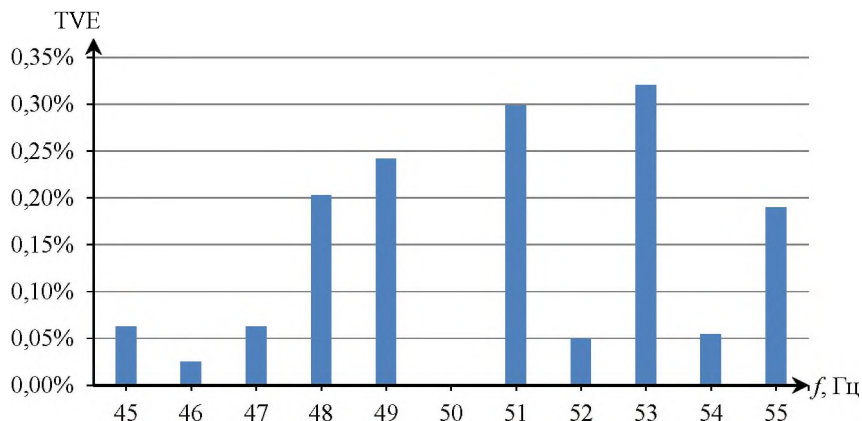


Рис. 5. Ошибки TVE при расчете СВИ на рабочей частоте при изменении числа анализируемых отсчетов теоретического сигнала

Fig. 5. TVE errors when calculating SWI at operating frequency when the number of analyzed readings of theoretical signal changes

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Изменение количества отсчетов, используемых при ДПФ, в зависимости от реальной частоты сети позволяет сократить ошибки TVE до 0,32%, что уже удовлетворяет требованиям точности для РЗА (< 1%).

Рассмотрим второй подход учета реальной частоты сети – передискретизация (*resampling*) дискретного сигнала ($f_{\text{дискр}} = 80 \cdot f_0$) до частоты $f_{\text{дискр}} = 80 \cdot f_p$. При подобной процедуре число отсчетов сохраняется, но плавно изменяется частота дискретизации, что позволит более точно (по сравнению с первым вариантом) подстроиться под частоту реального сигнала.

На рисунке 6 представлены результаты расчета TVE при передискретизации сигналов с частотами от 45 до 55 Гц.

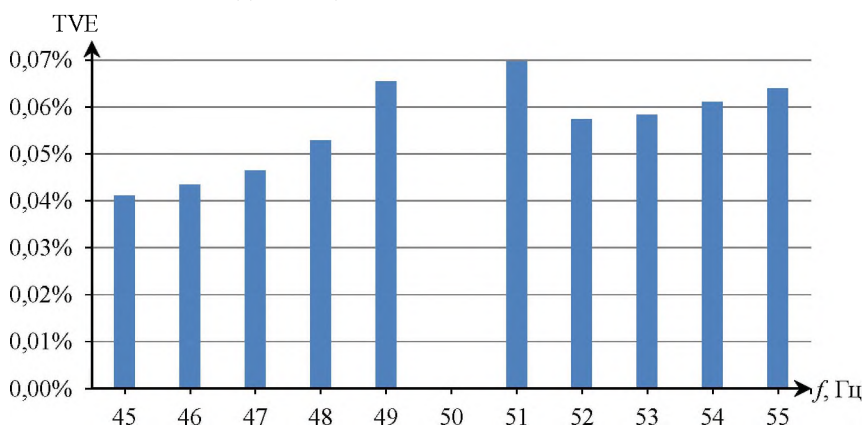


Рис. 6. Ошибки TVE при расчете СВИ на рабочей частоте при передискретизации теоретического сигнала

Fig. 6. Errors of TVE in calculation of SWI on the operating frequency during re-sampling of theoretical signal

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Учет реальной частоты сети за счет передискретизации сигнала дает меньшие ошибки, чем при изменении числа отсчетов сигнала. Величина ошибок имеет допустимые значения как для задач учета мощности, так и для защит.

Третий подход для учета рабочей частоты включает в себя как подбор количества отсчетов N_p по табл.1, так и передискретизацию сигнала на частоте равной $f_{\text{дискр}} = N_p \cdot f_p$. При этом ДПФ каждый раз будет выполняться для различного количества точек, например, для частоты 55 Гц получим $N_p = 73$ и $f_{\text{дискр}} = 4015$ Гц, а для частоты сигнала 45 Гц – $N_p = 89$ и $f_{\text{дискр}} = 4005$ Гц. Получаемые при таком подходе ошибки TVE представлены на рисунке 7 и составляют менее 0,04%.

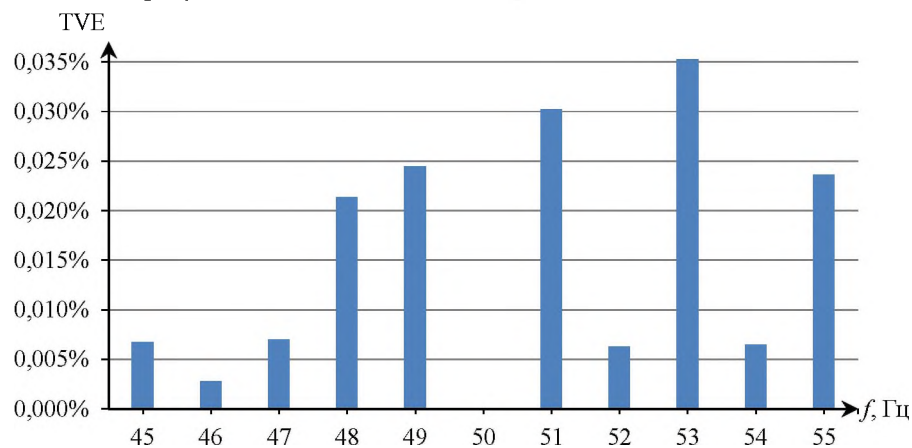


Рис. 7. Ошибки TVE при расчете СВИ на рабочей частоте при передискретизации теоретического сигнала с подбором числа отсчетов

Fig. 7. Errors of TVE in calculation of SWI on the operating frequency during re-calibration of the theoretical signal with the selection of the number of counts

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Таким образом, при известной частоте сети удастся добиться снижения ошибки TVE до менее 0,04% во всем допустимом диапазоне частот, при этом начальная фаза теоретического сигнала практически не влияет на величину ошибок.

СВИ при наличии высших гармоник

Было выполнено исследование влияния высших гармоник на ошибки TVE определения СВИ, с подбором количества отсчетов и передискретизацией. К исходному теоретическому сигналу основной гармоники была добавлена вторая гармоника с частотой $2f_p$ и амплитудой $X_{m2} = X_{m1} \cdot 10\%$. Затем были рассчитаны ошибки TVE определения вектора основной X_1 и второй X_2 гармоник, результаты представлены на рисунке 8.

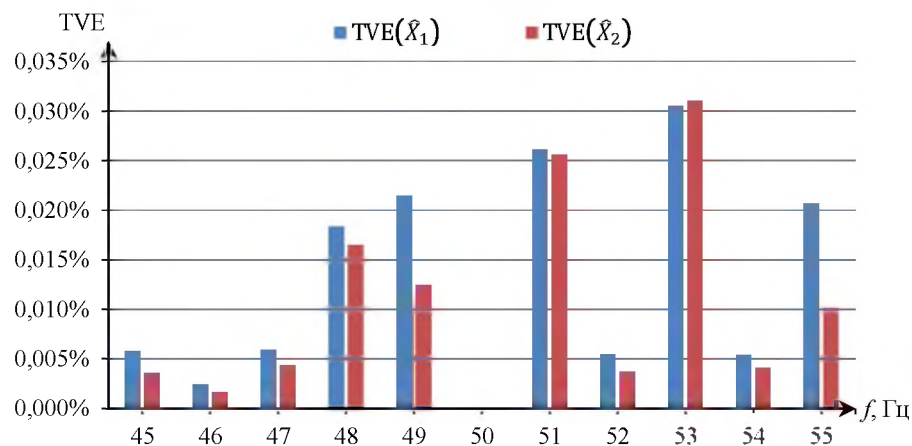


Рис. 8. Ошибки TVE при расчете СВИ на рабочей частоте для первой и второй гармоник

Fig. 8. TVE errors when calculating SWI on the working frequency for the first and second harmonics

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Значение TVE для первой гармоники осталось в пределах 0,04%. TVE второй гармоники также находится в диапазоне до 0,04%, т.е. СВИ применимы для РЗА.

В ходе дальнейших испытаний в сигнал была добавлена еще и 3-я гармоника с частотой $3f_p$, амплитудой $X_{m3} = X_{m1} \cdot 10\%$. Результаты расчета ошибок TVE определения СВИ основной X_1 , второй X_2 и третьей X_3 гармоник представлены на рисунке 9.

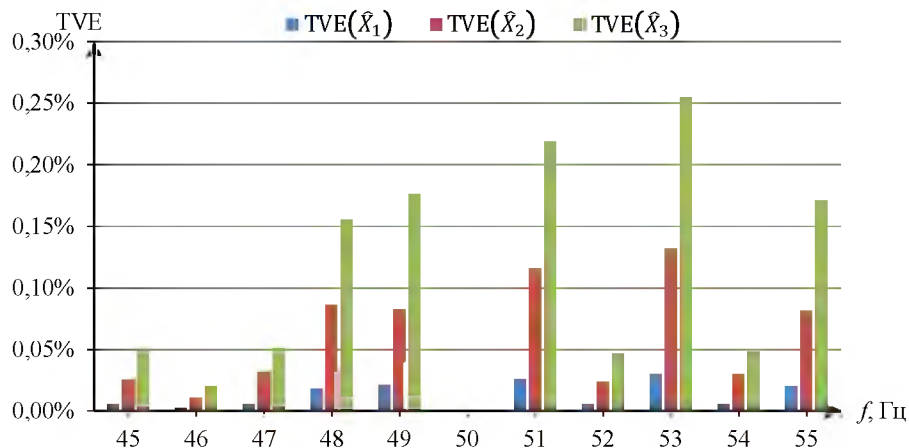


Рис. 9. Ошибки TVE при расчете СВИ на рабочей частоте для первых трех гармоник

Fig. 9. TVE errors when calculating SWI on the working frequency for the first three harmonics

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

При включении третьей гармоники значения TVE для первой гармоники практически не изменились, значения TVE второй гармоники увеличились до 0,13%, для третьей гармоники TVE достигли 0,25%, т.е. результаты допустимы для РЗА.

ДПФ при расчете мощности

В заключительной серии испытаний анализировались ошибки TVE определения активной, реактивной и вектора полной мощности первой гармоники и суммы трех гармоник (амплитуды напряжения и тока второй и третьей гармоники составляли по 10 % от амплитуд первой). результаты расчетов представлены на рисунках 10 и 11. Полученные ошибки не превосходят допустимых значений, т.е. определение мощностей первой гармоники с помощью ДПФ может применяться для РЗА, а определение мощностей суммарного сигнала может применяться для задач учета мощности.

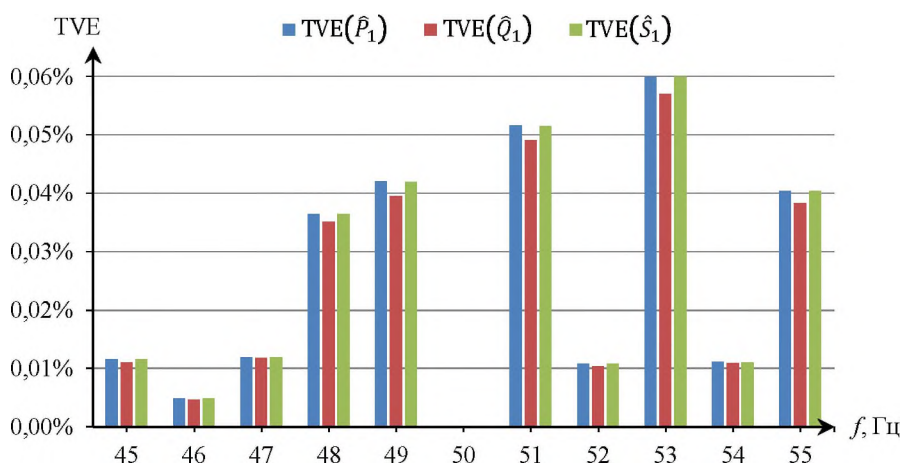


Рис. 10. Ошибки TVE при расчете на рабочей частоте активной и реактивной мощностей, а также вектора полной мощности для первой гармоники при наличии второй и третьей гармоники в сигнале

Fig. 10. TVE errors when calculating the active and reactive power at the operating frequency, as well as the full power vector for the first harmonic when there is a second and third harmonic in the signal

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

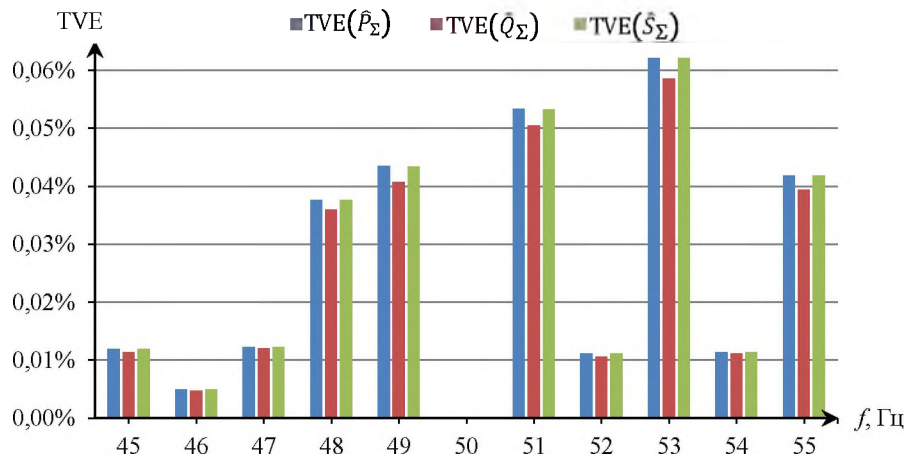


Рис. 11. Ошибки TVE при расчете на рабочей частоте активной и реактивной мощностей, а также вектора полной мощности сигнала, содержащего первые три гармоники

Fig. 11. TVE errors when calculating on the operating frequency of active and reactive capacities, as well as the vector of the full power of the signal containing the first three harmonics

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Предвычисления РЗА

При реализации ЦПС четвертого типа алгоритмы РЗА должны реализовываться на центральном сервере ЦРЗА. Например, алгоритм работы токовой отсечки без выдержки времени фазы A (с измеренным током фазы I_A и уставкой защиты $I_{уставки}$) будет состоять всего из одной строки кода¹: «If ($I_A > I_{уставки}$) then TRIP». Этот алгоритм достаточно прост и не сильно нагружает вычислительные ресурсы сервера ЦРЗА.

Алгоритмы дистанционной защиты несколько сложнее, так как выделяется несколько зон срабатывания в двумерной плоскости активного R и реактивного X сопротивлений. Границы этих зон срабатывания достаточно сложны. При этом необходимо определить, в какую зону дистанционной защиты попало измеренное значение сопротивления ($R_{изм}$, $X_{изм}$) петли короткого замыкания. Этот алгоритм может быть упрощен при использовании так называемых «предвычислений»: заранее, на этапе конфигурирования и настройки терминала РЗА, вся плоскость (R , X) с учетом требований точности разбивается с шагом (ΔR , ΔX) на элементарные прямоугольные области. Для каждой элементарной прямоугольной области сопротивлений определяется в какую зону срабатывания защиты она попадает. Таким образом, за счет предвычислений осуществляется переход от непрерывной плоскости (R , X) к дискретной таблице T , состоящей из конечного количества ячеек, в которых содержится номер зоны срабатывания защиты для каждой элементарной области плоскости (R , X). Тогда для реализации алгоритма дистанционной защиты при измерении сопротивлений $R_{изм}$ и $X_{изм}$ необходимо определить номер строки $N = R_{изм} / \Delta R$ и столбца $M = X_{изм} / \Delta X$ и из соответствующей ячейки таблицы T извлечь номер зоны срабатывания.

Перенос обработки аналоговых сигналов с устройств РЗА ближе к измерительным устройствам (оптические цифровые измерительные трансформаторы, analog merging unit AMU, УСВИ), применение предварительной обработки сложных уставок РЗА («предвычисления») – все это значительно уменьшает вычислительную сложность работы устройств РЗА, позволяя собрать все необходимые защиты и алгоритмы автоматики в одном устройстве – в центральном сервере релейной защиты и автоматики, тем самым реализовав четвертый тип ЦПС.

Заключение (Conclusions)

В работе исследована возможность применения для ЦРЗА сигналов СВИ в качестве альтернативы сигналам SV. Установлено, что классические сигналы СВИ, измеряемые на номинальной частоте для нужд СМПП, не могут применяться для РЗА и необходимо измерять СВИ на реальной частоте. Предложена методика расчета СВИ на реальной частоте с помощью ДПФ, определены возникающие при этом ошибки TVE для сигналов с частотой, отличной от номинальной, при наличии и отсутствии высших

¹ Строка «If ($I_A > I_{уставки}$) then TRIP» означает следующее: «Если (If) измеренный ток (I_A) больше уставки защиты ($I_{уставки}$) токовой отсечки без выдержки времени, тогда (then) сразу подается команда отключения выключателя (TRIP), и выключатель отключает участок сети с коротким замыканием, таким образом защищая оборудование сети от повреждений большим током короткого замыкания.

гармоник. Показано, что СВИ, рассчитанные на реальной частоте с помощью ДПФ, могут применяться для задач РЗА и учета мощности на ЦПС четвертого типа. Использование сигналов СВИ для РЗА снизит нагрузку на цифровую сеть ЦПС и упростит реализацию централизованной РЗА на ЦПС. Предложена методика предвычислений для РЗ, позволяющая дополнительно сократить нагрузку на сервер ЦРЗА.

Следует отметить, что определенная в СВИ фаза (привязанная уже к центру интервала интегрирования при вычислениях) становится максимально приближенной к фазе реальных токов и напряжений, соответственно такая ЦПС может работать в связке с обычными подстанциями; также централизованное вычисление СВИ добавляет задержку в срабатывании релейной защиты от половины до одного периода первой гармоники рабочей частоты, однако и микропроцессорные терминалы РЗА затрачивают схожее время для подсчета амплитуды и фазы токов и напряжений.

Литература

1. Ferrer, H.J.A. Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems / H.J.A. Ferrer, III E.O. Schweitzer. – Pullman, SEL, 2010. – 397 p.
2. Мокеев А.В., Пискунов С.А., Ульянов Д.Н., Хромцов Е.И. Повышение эффективности и надежности РЗА цифровых подстанций и цифровых РЭС // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 3 (47). С. 92-100.
3. Жуков А.В., Дубинин Д.М., Расщепляев А.И., Харламов В.А. Опыт организации коммуникационных сетей передачи данных СВИ в системах мониторинга и управления // Энергетик. 2021. № 6. С. 3-8.
2. Mokeev A.V., Piskunov S.A., Ulyanov D.N., Khromtsov E.I. Improving the efficiency and reliability of relay protection and automation equipment for digital substations and digital distribution electronics // Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. 2020. Vol. 12. No. 3 (47). pp. 92-100.
3. A.V. Zhukov, D.M. Dubinin, A.I. Rassheplyaev, and V.A. Kharlamov, Russ. Experience in organizing communication networks for data transmission of SMI in monitoring and control systems // Energetik. 2021. No. 6. S. 3-8.
4. Synchrophasor Monitoring for Distribution Systems: Technical Foundations and Applications. A White Paper by the NASPI Distribution Task Team, NASPI-2018-TR-001, January 2018, 62 p.
5. Фадке А.Г., Торп Д.С. Синхронизированные векторные измерения и их применение. М.: Техносфера. – 2021. – 320 с.
6. Paramo, G.; Bretas, A.; Meyn, S. Research Trends and Applications of PMUs. Energies 2022, 15, 5329
7. Kasimov, V.A. Digital processing of location monitoring reflectograms of overhead transmission lines // International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2019, 8(5), pp. 2231–2238.
8. Minullin, R.G., Piskovatskiy, Y.V., Kasimov, V.A. Model and Experimental Detection of Single Phase-to-Earth Faults of Overhead Conductors in 6-10 kV Distribution Circuits by a Location Method // Proceedings - 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, 2020, pp. 411–415
9. Минуллин Р.Г., Писковацкий Ю.В., Касимов В.А., Мустафин Р.Г., Виноградов В.Ю. Определение места повреждения локационным методом на линиях электропередачи с ответвлениями // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 3 (51). С. 69-80.
10. Ivankovic I., Brnobic D. Distance Protection Based on the Synchrophasor Data in Control Room // Proceedings 9th Eur. Conf. Ren. Energy Sys. 21-23 April 2021. – Istanbul.
11. Мокеев А.В., Пискунов С.А. Применение технологии синхронизированных векторных измерений для совершенствования дистанционной защиты // Релейная защита и автоматизация. 03, сентябрь 2022, с.12-17.
12. Максимов Б.К. и др. Синхронизированные векторные измерители параметров режима электроэнергетических систем в различных условиях работы // Максимов Б.К., Климова Т.Г., Жуков А.В., Дубинин Д.М. Электричество, 2018, No 6, с. 16–23. DOI:10.24160/0013 5380 2018 6 16 23.
13. Mark Adamiak, William Premerlani, Dr. Bogdan Kasztenny. Synchrophasors:

Definition, Measurement, and Application // [gegridsolutions.com](https://www.gegridsolutions.com), <https://www.gegridsolutions.com> p.57-62.

14. Jain et al. High-accuracy analog measurements via interpolated FFT // Jain, V.K., Collins, W.L. and Davis, D.C. (1979), IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 28, No. 2, pp.113–122.

15. Romano, P. and Paolone, M. Enhanced interpolated-DFT for synchrophasor estimation in FPGAs: theory, implementation, and validation of a PMU prototype // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, (2014) Vol. 63, No. 12, pp.2824–2836.

16. Khettaoui, B. and Boudour, M. Synchrophasor estimation using the three-point interpolated DFT based on polynomial approximation // International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), (2018) Algiers, Algeria, pp.1–5.

Авторы публикации

Мустафин Рамиль Гамилович – канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» Казанского государственного энергетического университета.

Касимов Василь Амирович – д-р техн. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Ferrer H.J.A. Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems. H.J.A. Ferrer, III E.O. Schweitzer. Pullman, SEL, 2010. 397 p.

2. Mokeev AV, Piskunov SA, Ulyanov DN, et al. Improving the efficiency and reliability of relay protection and automation equipment for digital substations and digital distribution electronics. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2020;12;3(47):92-100.

3. Zhukov AV, Dubinin DM, Rassheplyaev AI., Experience in organizing communication networks for data transmission of SMI in monitoring and control systems. *Energetik*. 2021;6:3-8.

4. Synchrophasor Monitoring for Distribution Systems: Technical Foundations and Applications. *A White Paper by the NASPI Distribution Task Team*, NASPI-2018-TR-001, January 2018, 62 p.

5. Fadke AG, Thorp DS. Synchronized vector measurements and their application. Moscow: Technosphere. 2021. 320 p.

6. Paramo, G, Bretas, A, Meyn S. *Research Trends and Applications of PMUs*. *Energies* 2022;15;5329

7. Kasimov VA. Digital processing of location monitoring reflectograms of overhead transmission lines. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2019;8(5):2231–2238.

8. Minullin RG, Piskovatskiy YV, Kasimov, V.A. *Model and Experimental Detection of Single Phase-to-Earth Faults of Overhead Conductors in 6-10 kV Distribution Circuits by a Location Method*. Proceedings - 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, pp. 411–415

9. Minullin RG, Piskovatskiy YuV, Kasimov VA, et al. Determining the location of damage by the location method on power lines with branches. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2021;13;3 (51):69-80.

10. Ivankovic I, Brnobic D. *Distance Protection Based on the Synchrophasor Data in Control Room*. Proceedings 9th Eur. Conf. Ren. Energy Sys. 21-23 April 2021. Istanbul.

11. Mokeev AV, Piskunov SA. Application of synchronized vector measurement technology to improve distance protection. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*. 03 September 2022, Pp.12-17.

12. Maksimov BK. et al. *Synchronized vector meters of the mode parameters of electric power systems in various operating conditions*. Maksimov B.K., Klimova T.G., Zhukov A.V., Dubinin D.M. *Elektrichestvo*, 2018;6:16–23. doi:10.24160/0013 5380 2018 6 16 23.

13. Mark Adamiak, William Premierlani, Dr. Bogdan Kasztenny. *Synchrophasors: Definition, Measurement, and Application*. [gegridsolutions.com](https://www.gegridsolutions.com). <https://www.gegridsolutions.com> p.57-62.

14. Jain et al. *High-accuracy analog measurements via interpolated FFT*. Jain, V.K., Collins, W.L. and Davis, D.C. (1979), IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1997;28(2):113–122.
15. Romano, P. and Paolone, M. *Enhanced interpolated-DFT for synchrophasor estimation in FPGAs: theory, implementation, and validation of a PMU prototype*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, (2014);63:12:2824–2836.
16. Khettaoui, B. and Boudour, M. *Synchrophasor estimation using the three-point interpolated DFT based on polynomial approximation*. International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), (2018) Algiers, Algeria, pp.1–5.

Authors of the publication

Ramil G. Mustafin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vasil A. Kasimov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности:

2.4.3. Электроэнергетика (технические науки)

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено

21.02.2023г.

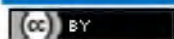
Отредактировано

06.03.2023г.

Принято

20.03.2023г.

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 621.314

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-2-124-136

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА, ОСНОВАННЫЙ НА ФРАКТАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Басенко В.Р., Ившин И.В., Владимиров О.В., Низамиев М.Ф.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
vasiliybas123@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Цель данной работы – усовершенствование метода вибрационного контроля силового трансформатора за счет применения фрактального анализа амплитудно-временного сигнала. Фрактальный анализ амплитудно-временной характеристики позволит количественно оценить степень «изрезанности» вибрационного сигнала трансформатора, связанной с дефектом. Для количественной оценки введен коэффициент фрактального анализа (КФА) на основе определения фрактальной размерности по методу Хаусдорфа-Безиковича. Для апробации разработанного метода применен бесконтактный лазерный измерительно-диагностический комплекс (ЛКИК) с разработанным программным обеспечением на основе LabVIEW, ImageJ и Python. Проведены экспериментальные исследования трансформатора ТСЗ 16 с использованием разработанного метода и ЛКИК. Определен КФА обмоток и магнитопровода исследуемого трансформатора, уровень технического состояния для контролируемых элементов трансформатора.

МЕТОДЫ. Усовершенствованный метод контроля позволяет повысить точность контроля силового трансформатора во время его работы под напряжением, что позволяет перейти от плановой системы ремонтов трансформаторов к системе вывода в ремонт по текущему техническому состоянию.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Усовершенствованный метод вибрационного контроля апробирован с помощью разработанного бесконтактного ЛКИК, определен уровень технического состояния силового трансформатора под напряжением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Усовершенствованный метод вибрационного контроля позволяет определять уровень технического состояния силового трансформатора под напряжением с возможностью автоматического получения решения о техническом состоянии, а также использовать статистические методы обработки и анализа полученных с трансформатора сигналов.

Ключевые слова: фрактальный анализ; бесконтактный лазерный измерительно-диагностический комплекс; силовой трансформатор; амплитудно-временная характеристика; контроль технического состояния; программное обеспечение LabVIEW; программное обеспечение ImageJ; лазерный виброметр.

Для цитирования: Басенко В.Р., Ившин И.В., Владимиров О.В., Низамиев М.Ф. Усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния силового трансформатора, основанный на фрактальном анализе амплитудно-временной характеристики // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 124-136. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-124-136.

IMPROVED METHOD FOR VIBRATION CONTROL OF THE TECHNICAL CONDITION OF A POWER TRANSFORMER BASED ON FRACTAL ANALYSIS OF THE AMPLITUDE-TIME CHARACTERISTICS

Nizamiev MF, Basenko VR, Ivshin IV, Vladimirov OV.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

vasiliybas123@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* The purpose of this work is to improve the method of vibration control of a power transformer through the use of fractal analysis of the amplitude-time signal. Fractal analysis of the amplitude-time characteristics will allow to quantify the degree of «indentation» of the vibration signal of the transformer associated with a defect. For a quantitative assessment, the fractal analysis coefficient (FAC) was introduced based on the determination of the fractal dimension by the Hausdorff-Besikovich method. To test the developed method, a non-contact laser measuring and diagnostic complex (LCMC) with developed software based on LabVIEW, ImageJ and Python was used. Experimental studies of the transformer TSZ 16 were carried out using the developed method and LCIK. The CFA of the windings and magnetic circuit of the transformer under study, the level of technical condition for the controlled elements of the transformer are determined.

METHODS. The improved method of control makes it possible to increase the accuracy of control of a power transformer during its operation under voltage, which makes it possible to switch from a planned system of transformer repairs to a system for taking repairs according to the current technical condition.

RESULTS. The improved method of vibration control was tested using the developed non-contact LCIK, the level of technical condition of the power transformer under voltage was determined.

CONCLUSION. An improved method of vibration control makes it possible to determine the level of technical condition of an energized power transformer with the possibility of automatically obtaining a decision on the technical condition, as well as to use statistical methods for processing and analyzing the signals received from the transformer.

Keywords: *fractal analysis; non-contact laser measuring and diagnostic complex; power transformer; amplitude-time characteristic; technical condition control; LabVIEW software; ImageJ software; laser vibrometer.*

For citation: Nizamiev MF, Basenko VR, Ivshin IV, Vladimirov OV. Improved method for vibration control of the technical condition of a power transformer based on fractal analysis of the amplitude-time characteristics. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(2): 124-136. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-124-136.

Введение

Работоспособность современных силовых трансформаторов определяется надежностью его составных частей, а также обеспечивается системой технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) при эксплуатации. Техническое состояние электротехнических комплексов определяется по результатам их контроля и диагностики, что позволяет перейти к обслуживанию по их текущему техническому состоянию. Разработка новых, более точных, объективных, чувствительных, достоверных и рациональных методов определения технического состояния является актуальной задачей неразрушающего контроля силовых трансформаторов.

Диагностика электротехнического комплекса зависит от полноты диагностической информации. На современном этапе развития методов контроля технического состояния перспективным направлением является разработка новых подходов и методов обработки полученной диагностической информации.

Задачи диагностики часто являются трудно формализуемыми, т.к. характеризуются большим числом случайных факторов, действующих на силовой трансформатор в эксплуатации, множественностью причинно-следственных связей между данными факторами, отсутствием или сложностью формальных алгоритмов решения, неполнотой и нечеткостью исходных данных, нечеткостью конечных целей и ограничений при принятии решений [1].

Самыми эффективными методами контроля технического состояния силовых трансформаторов являются:

- хроматографический анализ растворенных газов в масле трансформатора;
- температурный контроль элементов трансформатора;
- контроль электрических параметров трансформатора;
- контроль вибрационных параметров силовых трансформаторов [10].

Трендом в области контроля технического состояния трансформаторов являются методы, позволяющие осуществить проведение измерений и испытаний под напряжением.

Методы вибрационного контроля, в отличие от остальных, позволяют осуществлять контроль трансформатора во время его работы под напряжением, также обладают высокой точностью, чувствительностью к зарождающимся и развивающимся дефектам, и возможностью применять компьютерные технологии для обработки и анализа информации [1].

По результатам анализа работ [4, 5, 6, 7] можно сделать вывод, что спектры вибрации бака трансформатора включают в себя от двух до десяти информативных частот. Для работоспособного трансформатора без явных дефектов амплитудный спектр будет содержать пики амплитуд на частотах 100 Гц, 300 Гц и 500 Гц. Появление амплитудного пика на частоте 100 Гц связано с протеканием в обмотках тока с промышленной частотой 50 Гц. Но данное значение частоты удваивается из-за магнитострикционного эффекта, действующего в обмотке. Наличие амплитудных пиков с частотами 300 и 500 Гц связано с магнитным насыщением магнитопровода силового трансформатора. Соответственно, анализируемые основные частоты 100 Гц, 300 Гц, 500 Гц амплитудного спектра не несут существенной информации для диагностики силового трансформатора.

Методики вибрационного контроля, представленные в работах [1, 2, 7, 8], основываются на сравнении эталонного (бездефектного) и текущих спектров вибрации активной части силового трансформатора. Однако, проведенные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что используемые программные обеспечения имеют погрешность при преобразовании амплитудно-временного сигнала в спектр с использованием быстрого преобразования Фурье. В результате возникновения дефекта в обмотке трансформатора появляются дополнительные моды колебаний во временном сигнале, но на амплитудном спектре существенных изменений вибрационных параметров не наблюдается.

Методики вибрационного контроля, представленные в работах [7, 8, 9, 11], позволяют оценить техническое состояние активной части силового трансформатора только как исправное и неисправное. Однако при оценке состояния как неисправное, обмотки или магнитопровод могут находиться в работоспособном состоянии, и нет необходимости в оперативном выводе такого трансформатора из эксплуатации. Но при этом при вибрационном контроле возникают трудности с интерпретацией вибрационного сигнала, ввиду его сложной систематизации, что может увеличить погрешность измерений и в дальнейшем привести к неверной оценке технического состояния активной части силового трансформатора [4, 5].

В этой связи необходимо усовершенствовать метод вибрационного контроля технического состояния силового трансформатора, используя фрактальный анализ амплитудно-временного сигнала, с целью более четкой формализации и получения количественной оценки вибрационных характеристик.

Материалы и методы.

Методы вибрационного контроля силового трансформатора

Современными методами вибрационного контроля силовых трансформаторов являются [2]:

- определение уровня вибрации стенки бака трансформатора;
- метод спектрального вибрационного контроля;
- метод частотного контроля.

Самым распространенным методом сегодня является метод спектрального вибрационного контроля. Но существующие системы вибрационного контроля, такие как «Веста» и «BALTECH», используют контактные датчики вибрации. Данные датчики обладают рядом существенных недостатков, влияющих на качество измерений. Данными недостатками являются:

- наличие неравномерности амплитудно-частотных характеристик (АЧХ);
- возникновение несовпадений АЧХ у однотипных датчиков;
- низкая повторяемость сигнала для датчика, находящегося на поверхности бака трансформатора, что приводит к высокому разбросу измерений вибрации;

- ограниченный температурный диапазон работы датчиков;
- трудоемкость процесса крепления датчика;
- влияние качества поверхности бака трансформатора (ровности, гладкости и чистоты) на сохранение широкого рабочего частотного диапазона;
- механический контакт «трансформатор – датчик» вызывает «ложные» сигналы, которые снижают качество измерений, что влияет на качество контроля трансформатора;
- небезопасность крепления датчиков на объекты повышенной опасности (под высоким напряжением).

Бесконтактные лазерные виброметры не имеют таких недостатков и позволяют проводить трудоемкие измерения в труднодоступных местах силового трансформатора без снижения качества измерений. Задача устранения недостатков контактных датчиков решена за счет создания бесконтактного лазерного контрольно - измерительного комплекса (ЛКИК) на основе лазерного виброметра [1.2].

Но при проведении вибрационного контроля технического состояния силового трансформатора также возникает ряд проблем с формализацией и количественной оценкой полученного амплитудного спектра. Рассмотрим проблемы, возникающие при проведении спектрального анализа вибрационных характеристик силового трансформатора.

Виброскорость элементов трансформатора V_{mp} является функцией от амплитуды смещения (виброперемещения) данного элемента трансформатора от своего начального положения в пространстве (1):

$$V_{mp} = \frac{\partial x}{\partial t} \quad (1)$$

Возникновение вибрации в трансформаторе, находящегося под напряжением, связано с колебаниями электромагнитного поля, поэтому функция виброскорости трансформатора имеет гармонический вид (2):

$$V_{mp} = \frac{\partial x}{\partial t} = V_a \cos(\omega t) = V_a \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

Графиком данной функции является синусоида. Для силовых трансформаторов определен информативно-частотный диапазон – 100 - 700 Гц [3]. Для работоспособного трансформатора без явных дефектов амплитудный спектр будет содержать пики амплитуды на частоте 100 Гц, 300 Гц и 500 Гц. Появление амплитудного пика на частоте 100 Гц связано с протеканием в обмотках тока с промышленной частотой 50 Гц. Но данное значение частоты удваивается из-за магнитострикционного эффекта, действующего в обмотке. Наличие амплитудных пиков с частотами 300 и 500 Гц связано с магнитным насыщением магнитопровода силового трансформатора. [3]

В амплитудном спектре вибрации трансформатора в области частот меньших 100 Гц находятся вибрации, связанные с собственными вибрациями конструкции, либо же вибрации от систем охлаждения трансформатора, если таковые имеются. Частоты более 1000 Гц могут быть вызваны различными причинами, в частности для масляных трансформаторов данные вибрации связаны с колебательными процессами в масле, но, чаще всего, в диапазоне частот от 1000 Гц и выше вибрации обмоток и магнитопровода затухают, поэтому информативность данной области амплитудного спектра вибрации трансформатора очень низка.

Вибрационный сигнал идеально работающего трансформатора должен содержать частоту 100 Гц, которая вызвана магнитострикционным эффектом. Амплитудно-временная характеристика (ABX) идеально работающего трансформатора имеет вид, как показано на рисунке 1.

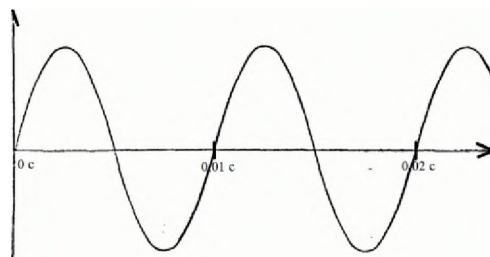


Рис.1 Амплитудно-временная характеристика *Fig.1 Amplitude-time characteristic of an ideally working transformer*

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

На практике, при измерении вибрации работающего трансформатора получается сигнал, имеющий сложную форму, состоящий из множества синусоид, но при этом, измеренный сигнал сохраняет периодичность, как показано на рисунке 2.

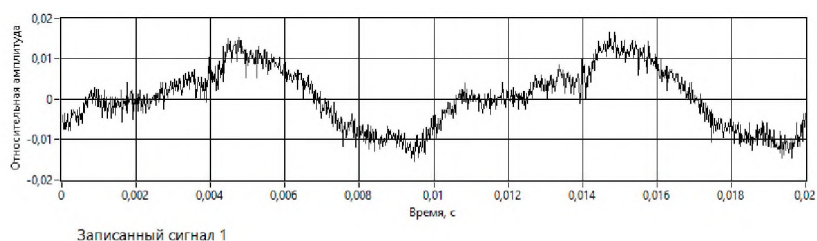


Рис.2. Амплитудно-временная характеристика работающего трансформатора *Fig.2. Amplitude-time characteristic of a working transformer*

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

На сегодняшний день, из данных временных сигналов строят амплитудные спектры для анализа технического состояния трансформатора. Пример амплитудного спектра представлен на рисунке 3.

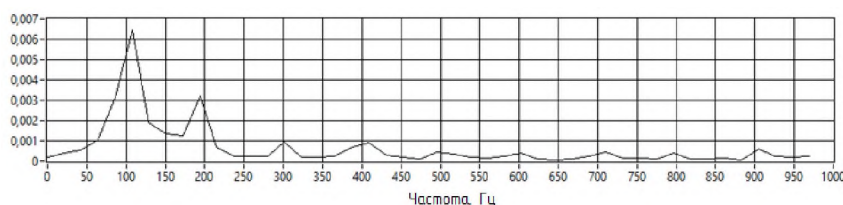


Рис.3. Амплитудный спектр работающего трансформатора *Fig.3. Amplitude spectrum of a working transformer*

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

При этом анализируется возникновение амплитуды виброскорости на характерной частоте. Но по амплитудному спектру сложно количественно оценить состояние той или иной части трансформатора. Возникновение или отсутствие пиков амплитуд на частотах, отличных от 100 Гц могут носить случайный характер или содержать программную ошибку. Ниже представлены амплитудно-временные характеристики трансформатора ТСЗ и построенные из них амплитудные спектры.

На рисунке 4 представлена амплитудно – временная характеристика обмотки трансформатора ТСЗ. Данная обмотка трансформатора не имеет дефектов и находится в хорошем техническом состоянии, поэтому форма вибрационного сигнала очень близка к синусоидальной.

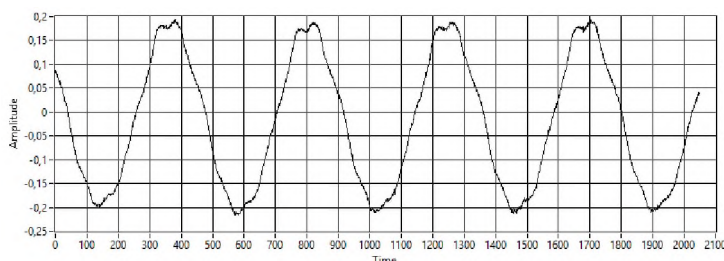


Рис.4. Амплитудно - временная характеристика бездефектной обмотки трансформатора ТСЗ *Fig.4. Amplitude - time characteristic of the defect-free winding of the transformer TSZ*

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Из представленной на рисунке 4 АВХ построен амплитудный спектр виброскорости бездефектной обмотки, который представлен на рисунке 5.

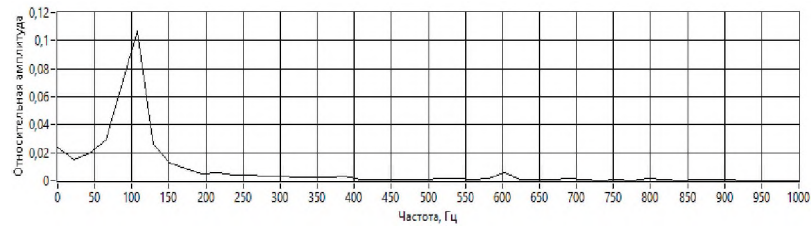


Рис.5. Амплитудный спектр бездефектной обмотки трансформатора ТСЗ

Fig.5. Amplitude spectrum of the defect-free winding of the transformer TSZ

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В построенном амплитудном спектре присутствует только амплитуда виброскорости на частоте 100 Гц, так как обмотка является бездефектной.

Рассмотрим АВХ и амплитудный спектр обмотки с зарождающимся дефектом изоляции обмотки. Обмотка имеет повреждение изоляции, что приводит к дополнительному нагреву до 5-7 градусов Цельсия. Её АВХ представлена на рисунке 6.

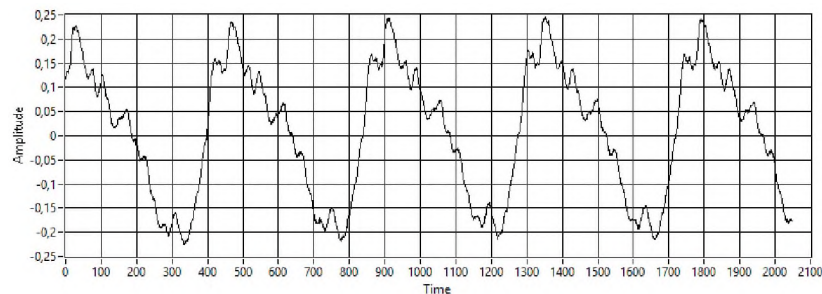


Рис.6. Амплитудно - временная характеристика дефектной обмотки трансформатора ТСЗ

Fig.6. Amplitude - time characteristic of the defective winding of the transformer TSZ

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В результате появления дефекта в обмотке, частично изменились механические и электрические характеристики обмотки трансформатора, что привело к изменению АВХ. Появились дополнительные моды колебаний в вибрационном сигнале трансформатора. Но на амплитудном спектре данного сигнала существенных изменений в составе спектра, в отличие от спектра бездефектной обмотки, не наблюдается (рис. 7).

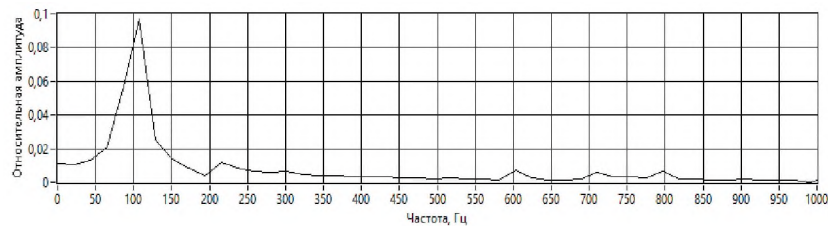


Рис.7. Амплитудный спектр дефектной обмотки трансформатора ТСЗ

Fig.7. Amplitude spectrum of the defective winding of the transformer TSZ

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Поэтому, необходимо решить задачу повышения точности и качества проведения вибрационного анализа силового трансформатора, путем более четкой формализации и получения количественной оценки вибрационных характеристик с помощью фрактального анализа.

Метод фрактального анализа вибрационного сигнала силового трансформатора

Для решения задачи повышения качества диагностики силового трансформатора предлагается применять метод фрактального анализа на основе определения фрактальной размерности виброскорости измеренного сигнала [9,10]. Данный метод заключается в следующем. График амплитудно-временной характеристики трансформатора будет разбиваться на равномерную квадратную сетку с длиной стороны квадрата, равного ε и с числом ячеек равным N . Далее будет определяться фрактальная размерность виброскорости силового трансформатора, по методу Хаусдорфа-Безиковича [11], с помощью формулы (3):

$$Dv = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)} \quad (3)$$

Фрактальная размерность характеризует степень «изрезанности» амлитудно-временной характеристики виброскорости трансформатора. Так как, вибрационный сигнал работающего трансформатора зависит не только от его технического состояния, но и от параметров окружающей среды и от режима эксплуатации [12,13], целесообразно оценивать не абсолютную фрактальную размерность, а ее значение относительно фрактальной размерности идеальной АВХ трансформатора. Идеальной является АВХ, которая содержит в себе только одну моду колебаний, с частотой 100 Гц (рисунок 1). Для оценки предлагается ввести коэффициент фрактального анализа (КФА), который будет рассчитываться следующим образом:

$$KFA = \frac{Dv}{D_{100}} \quad (4)$$

где Dv – фрактальная размерность Хаусдорфа-Безиковича АВХ виброскорости силового трансформатора;

D_{100} – фрактальная размерность Хаусдорфа-Безиковича АВХ идеального синусоидального сигнала с частотой 100 Гц. Полученный КФА будет являться диагностическим признаком, по которому будет оцениваться техническое состояние контролируемого трансформатора [14]. КФА предлагается оценивать на основе приказа министерства энергетики № 676 [20]. В зависимости от значения КФА трансформатору будет присваиваться решение о техническом состоянии. Данное решение будет иметь следующие формулировки:

- «очень хорошее»
- «хорошее»
- «удовлетворительное»
- «плохое»
- «критическое»

На сегодняшний день существует большое количество способов определения фрактальной размерности. В данном методе предлагается определять фрактальную размерность на основе тангенса угла наклона для зависимости логарифма размеров ячейки квадратной сетки АВХ виброскорости трансформатора от числа ячеек данной сетки [15].

Для определения граничных значений КФА использованы две типовые кривые. За идеальную, принята кривая, описывающая синусоиду с частотой колебаний 100 Гц (рисунок 1), так как она соответствует АВХ идеально работающего трансформатора. За кривую, КФА которой будет соответствовать критическому состоянию, принята кривая Киссветтера, представленная на рисунке 8.



Рис.8. Кривая Киссветтера

Fig.8. Kisswetter curve

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Кривая Киссветтера является ориентационной кривой в теории фракталов, у которой известна фрактальная размерность, равная 1.5 [14]. При этом КФА кривой Киссветтера будет превышать КФА АВХ любого трансформатора, так как информативный вибрационный сигнал трансформатора содержит в себе моды в диапазоне от 100 до 700 Гц и по степени «изрезанности» не превысит кривую Киссветтера.

Фрактальная размерность синусоиды (рисунок 1) равна $D = 1,003$, а так как она соответствует идеальному состоянию трансформатора, то её КФА = 1. Фрактальная размерность кривой Киссветтера $D = 1,5$, следовательно $KFA = \frac{1,5}{1,003} = 1,496$.

В диапазоне от 1 до 1.496 будут присваиваться решения о техническом состоянии трансформатора со следующими границами, в соответствии с приказом министерства энергетики № 676 [20]:

- «очень хорошее» - [КФА от 1 до 1.1];
- «хорошее» - [КФА от 1.101 до 1.2];

- «удовлетворительное» - [КФА от 1.201 до 1.3];
- «плохое» - [КФА от 1.301 до 1.4];
- «критическое» - [КФА от 1.401 до 1.496].

Результаты реализации усовершенствованного метода вибрационного контроля технического состояния силового трансформатора на основе фрактального анализа с помощью бесконтактного ЛКИК

С помощью разработанного ЛКИК [1] проведены экспериментальные исследования параметров вибрации работающего силового трансформатора ТСЗ 16 кВА (рисунок 9).



Рис.9. ТСЗ 16 кВА

Fig. 9. TSZ 16 kVA

**Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author*

При проведении измерений лазерный виброметр располагался на расстоянии 1 м от исследуемого силового трансформатора, для виброметра были установлены следующие характеристики:

- границы диапазона частот от 0 Гц до 22 кГц;
- максимальное значение виброскорости – 100 мм/с;
- разрешение по виброскорости – 0,02 (мкм/с)/Гц;
- частота дискретизации 44.1 кГц.

С данного трансформатора был снят защитный корпус для получения доступа к обмоткам и магнитопроводу. Измерения проводились непосредственно с трех обмоток и магнитопровода трансформатора [16, 17], точки измерений показаны на рисунке 10.

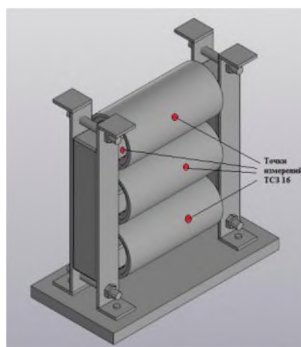


Рис.10. Точки измерений виброскорости ТСЗ 16 кВА

Fig.10. Vibration velocity measurement points TSZ 16 kVA

**Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author*

Результаты измерений с помощью разработанного ЛКИК представлены на рисунках 11-15 в виде АВХ виброскорости, построенных в разработанном программном обеспечении LabVIEW. На рисунках 11-13 представлены АВХ обмоток работающего трансформатора.

На рисунках 14-15 показаны АВХ магнитопровода до и после распрессовки.

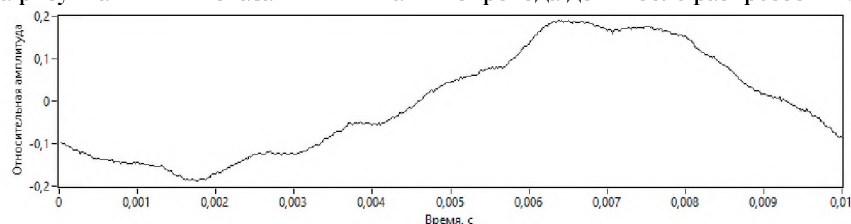


Рис.11. АВХ виброскорости верхней обмотки

Fig.11. ATR vibration velocity of the upper winding

**Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author*

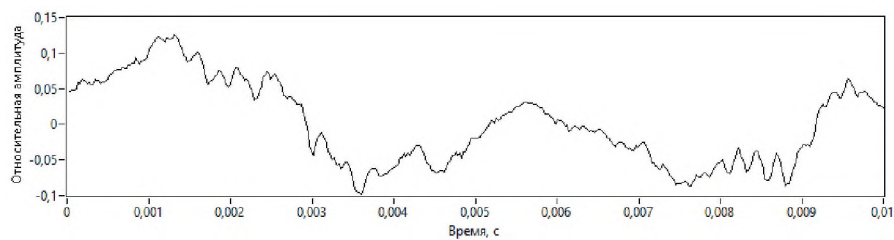


Рис.12. АВХ виброскорости средней обмотки (с дефектом) Fig.12. ATR vibration velocity of the middle winding (with a defect)

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

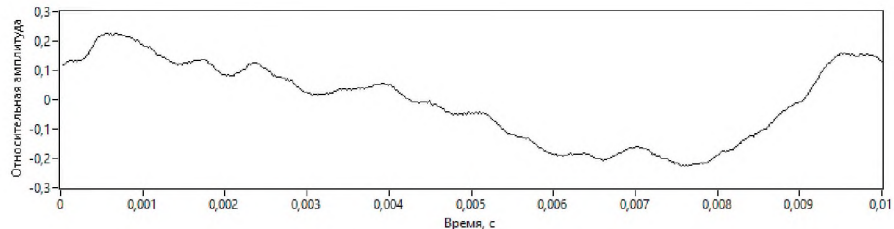


Рис.13. АВХ виброскорости нижней обмотки Fig.13. ATR vibration velocity of the lower winding

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

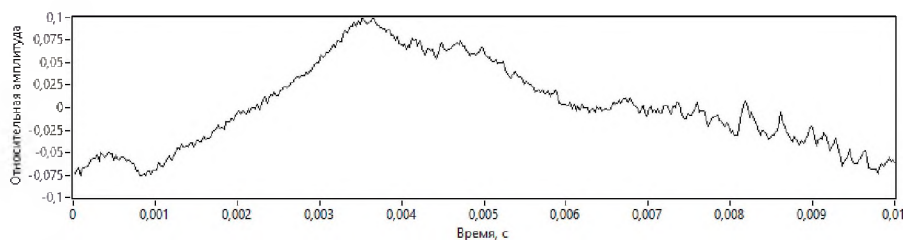


Рис.14. АВХ виброскорости магнитопровода до распрессовки Fig.14. ATR of the vibration velocity of the magnetic circuit before pressing out

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

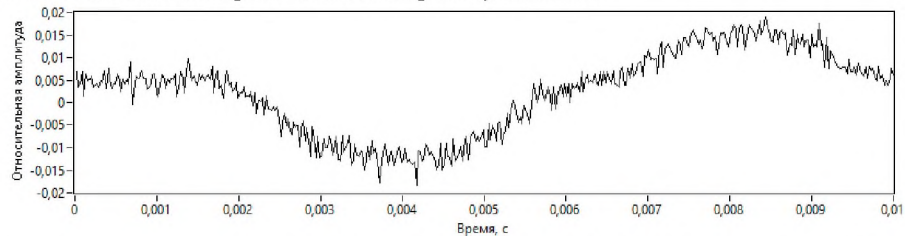


Рис.15. АВХ виброскорости магнитопровода после распрессовки Fig.15. ATR of the vibration velocity of the magnetic circuit after pressing out

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Для данных АВХ в разработанном программном обеспечении на основе ImageJ определены их фрактальные размерности. Фрактальная размерность определяется по формуле (1) и графически представляется как тангенс угла наклона от графика зависимости логарифмов числа ячеек сетки и размеров полученной ячейки. Определение фрактальной размерности АВХ виброскорости верхней обмотки ТСЗ 16 представлено на рисунке 16.

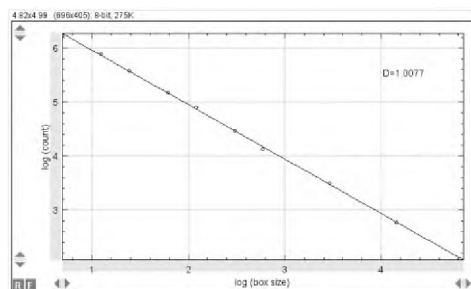


Рис. 16. График определения фрактальной размерности в программе ImageJ Fig. 16. Graph for determining the fractal dimension in the ImageJ program

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Результаты фрактального анализа трансформатора ТСЗ 16 представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Table 1

Результаты фрактального анализа ТСЗ 16

Results of TC3 fractal analysis 16

Показатель	Место измерения ТСЗ 16				
	верхняя обмотка	средняя обмотка	нижняя обмотка	магнитопровод до распрессовки	магнитопровод после распрессовки
D	1,06	1,12	1,0077	1,11	1,31
КФА	1,057	1,117	1,004	1,106	1,306
Состояние элемента трансформатора	очень хорошо	хорошо	очень хорошо	хорошо	неудовлетворительно

По результатам проведения фрактального анализа установлено, что верхняя и нижняя обмотка находятся в очень хорошем техническом состоянии, средняя обмотка и запрессованный магнитопровод определяются как элементы с хорошим техническим состоянием, а магнитопровод после распрессовки на 40 Н/м перешел в неудовлетворительное техническое состояние. Данные решения определяются в созданной подпрограмме «Вывод о техническом состоянии», в программной среде python. Внешний вид подпрограммы представлен на рисунке 17.

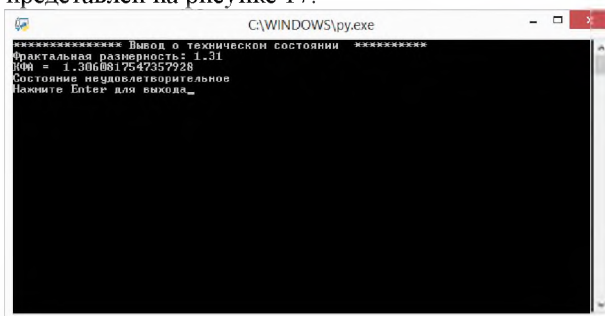


Рис.17. Подпрограмма «Вывод о техническом состоянии»

Fig.17. Subprogram «Conclusion on the technical condition»

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Применение усовершенствованного метода вибрационного контроля технического состояния силового трансформатора на основе фрактального анализа с помощью бесконтактного ЛКИК на трансформаторе ТСЗ 16 показало возможность обнаружения развивающихся дефектов, а также количественной оценки вибрационного сигнала силового трансформатора на основе расчета КФА.

Выводы

1. Разработан усовершенствованный метод контроля технического состояния силового трансформатора путем фрактального анализа АВХ виброскорости.
2. Разработанный метод контроля технического состояния реализован с помощью бесконтактного ЛКИК с разработанным программным обеспечением в среде LabVIEW, ImageJ и python.
3. С помощью бесконтактного ЛКИК с разработанным программным обеспечением проведены экспериментальные исследования контроля технического состояния трансформатора ТСЗ 16 по результатам которых:
 - построены амплитудно-временные характеристики виброскорости в 4 точках трансформатора ТСЗ, характеризующие уровень технического состояния его активной части;
 - рассчитаны КФА АВХ виброскорости силового трансформатора;
 - сделан вывод об ухудшении технического состояния средней обмотки и магнитопровода ТСЗ 16;
 - подтверждены интервалы КФА для принятия решения о техническом состоянии трансформатора.

4. Разработанный усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния силового трансформатора, основанный на фрактальном анализе АВХ позволяет:

- бесконтактно контролировать уровень технического состояния силового трансформатора;
- анализировать амплитудно-временные характеристики силового трансформатора на основе фрактального анализа;
- количественно оценивать вибрационные параметры силового трансформатора на основе определения КФА контролируемых элементов трансформатора;
- получать вывод о техническом состоянии силового трансформатора.

5. Разработанный усовершенствованный метод вибрационного контроля апробирован в результате экспериментальных исследований и подтвердил свою работоспособность по определению уровня технического состояния трансформатора.

Литература

1. Басенко В.Р. 3D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам / Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В. // ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022.Т. 24. № 3. С. 130-143.
2. Басенко В.Р. Диагностика трансформаторов электротехнических комплексов с использованием бесконтактных лазерных виброметров / Низамиев М.Ф., Басенко В.Р., Ившин И.В., Владимиров О.В. // ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022 Т. 24. № 5. С. 97-109.
3. Басенко В.Р., Владимиров О.В., Ившин И.В., Низамиев М.Ф. Бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс для определения уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора / Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 155-168.
4. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Анализ вибрационных сигналов силового трансформатора с применением лазерного измерительно-диагностического комплекса / «ЭНЕРГИЯ-2020» Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Сборник материалов конференции, 2020. Т. 3. С.26
5. Гавриленко А.В., Долин А.П. Система контроля качества прессовки обмоток и стали трансформаторов по замерам вибрации, контроль состояния маслонасосов / Димрус – Пермь: 2015. С. 60.
6. Низамиев М.Ф., Ившин И.В. Контроль технического состояния электротехнического оборудования / Энергетическая безопасность. Сборник научных статей III Международного конгресса. 2020. С. 297-300.
7. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Максимов В.В., Билалов Ф.Ф. Измерительно-диагностический комплекс для контроля технического состояния электротехнического оборудования / Электрика 2015. С.18–25.
8. Лазарев И.В. Осевые усилия в элементах активной части силового трансформатора при запрессовке обмоток, изменении температуры и влагосодержания изоляционных материалов / Динамика и прочность машин. 2014. С.12-18.
9. Ivshin I.V., Nizamiev M.F., Vladimirov O.V., Dolomanyk L.V. Vibration Method for Monitoring the Technical Condition of Support-Rod Insulators Using Non-Contact Laser Vibrometry Methods / 14-th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 44894 Proceedings. V.1, Pt 5, Novosibirsk 2018. P. 320-325.
10. Ivshin IV, Nizamiev MF, Vladimirov OV, et al. The Method of Non-Contact Vibration Control of Energy Device Detail State Based on the Use of Informativ Frequencies of Own Vibrations Related to Certain Types of Defects / Ad Alta. Journal of Interdisciplinary Research, Volum 8, Issue 1, Special Issue III. 2018. P. 322-333.
11. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Анализ вибрационных сигналов силового трансформатора с применением лазерного измерительно-диагностического комплекса // «ЭНЕРГИЯ-2020». 2020. С.26.
12. Рыбаков Л.М.. Методы и способы оценки состояния силовых трансформаторов в ходе эксплуатации // Вестник Чувашской ГСХА. №2, 2018, С.108-111.
13. Низамиев М.Ф. Анализ методов исследования виброакустических характеристик деталей сложной формы и технических средств обработки сигналов сложной формы. 2014. №Т.1 С. 151-152.
14. Нгуен Тиен, Гильфанов К.Х. Тепловое моделирование маслонаполненного силового трансформатора ТМ-160/10 // Известия высших учебных заведений. Проблемы

энергетики. 2019. № 5. С. 141-151.

13. Kurtz C, Ford G, Vainberg M., et al. Managing aged transformers. *Transmission & Distribution World*. 2005, July. P. 36–45.

14. Metwally I.A. Failures, monitoring, and new trends of power transformers // *IEEE potentials*. – 2011, May/June. P. 36–43.

15. Theil G. Parameter evaluation for extended Markov models applied to condition- and reliability-centered maintenance planning strategies // *Proc. 9th Int. Conf. on Probab. Methods Applied to Power Syst.*, KTH, Stockholm, Sweden. 2006.

16. Грачева Е.И., О.В. Наумов, Федотов Е.А. Влияние нагрузочной способности силовых трансформаторов на их эксплуатационные характеристики // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. № 7-8. С. 71-77.

17. Мустафин Р.Г., Ярыш Р.Ф. Дифференциальный способ обнаружения витковых замыканий в трехфазном трансформаторе // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2020. № 3. С. 78-89

18. Приказ Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей».

Авторы публикации

Низамиев Марат Фирденатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Басенко Василий Романович – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Ившин Игорь Владимирович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Владимиров Олег Вячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Basenko VR, Basenko VR, Nizamiyev MF, et al. 3D model of a power transformer for the study of its technical condition by vibration parameters. *NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. ENERGY PROBLEMS*. 2022;24(3):130-143. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143

2. Basenko VR. Diagnostics of transformers of electrotechnical complexes using non-contact laser vibrometers / Nizamiyev MF, Basenko VR, Ivshin IV, Vladimirov OV. *NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. ENERGY PROBLEMS*. 2022;24(5):97-109. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-5-97-109

3. Basenko VR, Vladimirov OV, Ivshin IV, et al. Non-contact laser control and measuring complex for determining the level of pressing of windings and magnetic circuit of a power transformer. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2021;23(3):155-168.

4. Basenko VR, Nizamiyev MF. *Analysis of vibration signals of a power transformer using a laser measuring and diagnostic complex*. ENERGY-2020 - Fifteenth All-Russian (seventh international) scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists. 2020. Collection of conference materials, V. No. 3. P.26

5. Gavrilenko AV, Dolin AP. *Quality control system for pressing the windings and steel of transformers by measuring vibration, monitoring the state of oil pumps*. Dimrus - Perm: 2015. - P. 60.

6. Nizamiyev MF, Ivshin IV. Control of the technical condition of electrical equipment. *Energy security*. Collection of scientific articles of the III International Congress. 2020. P. 297-300

7. Nizamiyev MF, Ivshin IV, Maksimov VV, et al. Measuring and diagnostic complex for monitoring the technical condition of electrical equipment. *Electrica* 2015. P.18–25

8. Lazarev IV. Axial forces in the elements of the active part of a power transformer when pressing windings, changing the temperature and moisture content of insulating materials.

Dynamics and Strength of Machines. 2014. P.12-18

9. Ivshin IV, Nizamiev MF, Vladimirov OV, et al. *Vibration Method for Monitoring the Technical Condition of Support-Rod Insulators Using Non-Contact Laser Vibrometry Methods*. 14-th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) - 44894 Proceedings. Volume 1, Part 5, Novosibirsk 2018.P. 320-325.

10. Ivshin IV, Nizamiev MF, Vladimirov OV, et al. The Method of Non-Contact Vibration Control of Energy Device Detail State Based on the Use of Informativ Frequencies of Own Vibrations Related to Certain Types of Defects. *Ad Alta. Journal of Interdisciplinary Research*. 2018;8(1). Special Issue III., P. 322-333.

11. Basenko VR, Nizamiev MF. *Analysis of vibration signals of a power transformer using a laser measuring and diagnostic complex*. ENERGY-2020. 2020. P.26

12. Rybakov LM. Methods and methods for assessing the state of power transformers during operation. *Bulletin of the Chuvash State Agricultural Academy*., 2018;2:108-111

13. Nizamiev MF. *Analysis of methods for studying the vibroacoustic characteristics of parts of complex shape and technical means of processing signals of complex shape*. 2014;1:151-152.

14. Nguyen Tien, Gilfanov K.Kh. Thermal modeling of the TM-160/10 oil-filled power transformer. *Izvestiya vuzov. Energy Problems*. 2019;5:141-151 Kazan: KSPEU.

15. Kurtz C, Ford G, Vainberg M, et al. *Managing aged transformers*. Transmission & Distribution World. 2005, July. P. 36–45.

16. Metwally IA. *Failures, monitoring, and new trends of power transformers*. IEEE potentials. 2011, May / June. P. 36–43.

17. Theil G. *Parameter evaluation for extended Markov models applied to condition- and reliability-centered maintenance planning strategies*. Proc. 9th Int. Conf. on Probab. Methods Applied to Power Syst., KTH, Stockholm, Sweden. 2006.

18. Gracheva EI, O.V. Naumov E.A. Fedotov Influence of the load capacity of power transformers on their operational characteristics. *Izvestiya vuzov. Energy Problems*. 2017;7-8:71-77. Kazan: KSPEU.

19. Mustafin RG, Yarysh RF. Differential method for detecting turn short circuits in a three-phase transformer. *Izvestiya vuzov. Energy Problems*. 2020;3:78-89. Kazan: KSPEU.

20. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated July 26, 2017. No. 676 «On approval of the methodology for assessing the technical condition of the main technological equipment and transmission lines of power plants and electrical networks»

Authors of the publication

Marat F. Nizamiev - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vasily R. Basenko - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Igor V. Ivshin - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Oleg V. Vladimirov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности:

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений)

Получено

02.03.2023г.

Отредактировано

23.03.2023г.

Принято

24.03.2023г.



ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОЙ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Брякин И.В.¹, Бочкарев И.В.².

¹ Институт машиноведения и автоматизации Национальной академии наук
Кыргызской республики, г. Бишкек, Кыргызстан

² Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,
г. Бишкек, Кыргызстан

¹ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7463-8072>, bivas.2006@yandex.ru

²ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9873-9203>, elmech@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Среди различных методов оценки технического состояния энергетического оборудования важное место занимает вибродиагностика. Поэтому улучшение качества аппаратного обеспечения проведения вибродиагностики имеет в настоящее время чрезвычайно важное значение. ЦЕЛЬ. Разработать вибродатчик с новым принципом действия для систем технической вибродиагностики энергетического оборудования, а также теоретически обосновать работоспособность предложенного датчика. МЕТОДЫ. При решении поставленной цели применялись основные положения теории вибродиагностики. РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработана конструкция датчика виброускорения, особенность которой состоит в том, что его возбуждение осуществляется посредством конструктивных конденсаторов связи, первый электрод которых выполнен в виде металлического разрезного тонкостенного цилиндра, роль вторых электродов выполняет нижний ряд обмотки каждой измерительной катушки, а функцию инерционного элемента выполняет экран, выполненный в виде металлического кольца, закрепленного на подвесе в виде мембраны. На базе электрической схемы замещения датчика выполнено теоретическое обоснование его работоспособности и эффективности. Разработаны варианты схемотехнических решений первичного и вторичного измерительных преобразователей измерительного устройства для систем вибродиагностики. Первичный измерительный преобразователь содержит непосредственно датчик виброперемещений, источник синусоидального напряжения, входной дифференциальный измерительный усилитель и аналоговый фильтр, содержащий узкополосный фильтр, широкополосный усилитель и буферный усилитель. Вторичный измерительный преобразователь содержит квадратурный детектор информационных сигналов, выходной буферный усилитель и формирователь квадратурного опорного напряжения. Предложена также блок-схема аппаратного решения системы регистрации виброускорения. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанный датчик обладает улучшенными выходными показателями и может быть использован не только для виброконтроля энергетического оборудования, но и для измерения механических колебаний в системах технической диагностики различных других машин и механизмов, а также для задач спектральной сейсморазведки.

Ключевые слова: вибродиагностика; энергетическое оборудование; вибродатчик; токовихревое преобразование; конденсатор связи; измерительный мост.

Для цитирования: Брякин И.В., Бочкарев И.В. Измерительное устройство для систем технической вибродиагностики энергетического оборудования // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 137-152. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-137-152.

MEASURING DEVICE FOR SYSTEMS OF TECHNICAL VIBRO-DIAGNOSIS OF POWER EQUIPMENT

IV. Bryakin¹, IV. Bochkarev²

¹ Institute of Mechanical Engineering and Automation of the National Academy of Sciences

Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan

² Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, Bishkek, Kyrgyzstan

¹ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7463-8072>, bivas2006@yandex.ru

²ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9873-9203>, elmech@mail.ru

Summary: *RELEVANCE. Among the various methods for assessing the technical condition of power equipment, vibration diagnostics occupies an important place. Therefore, improving the quality of hardware for vibration diagnostics is currently extremely important. THE PURPOSE. To develop a vibration sensor with a new principle of operation for systems of technical vibration diagnostics of power equipment, as well as to theoretically substantiate the performance of the proposed sensor. METHODS. When solving the set goal, the main provisions of the theory of vibration diagnostics were applied. RESULTS. A design of the vibration acceleration sensor has been developed, the peculiarity of which is that it is excited by means of constructive coupling capacitors, the first electrode of which is made in the form of a thin-walled metal split cylinder, the role of the second electrodes is performed by the lower row of the winding of each measuring coil, and the function of the inertial element is performed by a screen made in the form of a metal ring fixed on a suspension in the form of a membrane. Based on the electrical equivalent circuit of the sensor, a theoretical substantiation of its operability and efficiency was made. Variants of circuit solutions for the primary and secondary measuring transducers of the measuring device for vibration diagnostics systems have been developed. The primary measuring transducer contains directly a vibration displacement sensor, a sinusoidal voltage source, an input differential measuring amplifier and an analog filter containing a narrow-band filter, a broadband amplifier and a buffer amplifier. The secondary measuring transducer contains a quadrature detector of information signals, an output buffer amplifier and a quadrature reference voltage driver. A block diagram of the hardware solution for the vibration acceleration registration system is also proposed. CONCLUSION. The developed sensor has improved output characteristics and can be used not only for vibration control of power equipment, but also for measuring mechanical vibrations in technical diagnostic systems of various other machines and mechanisms, as well as for tasks of spectral seismic exploration.*

Keywords: *vibrodiagnostics; power equipment; vibration sensor; eddy current conversion; coupling capacitor; measuring bridge.*

For citation: Bryakin IV, Bochkarev IV. Measuring device for systems of technical vibro-diagnosis of power equipment. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(2): 137-152. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-137-152.

Введение

В системах производства и распределения электроэнергии используется огромное количество разнообразного оборудования. Для его эксплуатации и ремонта в соответствии с рекомендациями производителей требуется большое число квалифицированных специалистов и большие трудозатраты, что вызывает на практике значительные трудности. Более того, в настоящее время практически на всех электростанциях, а также подстанциях передачи и распределения электроэнергии широко используется изношенное силовое электротехническое и энергетическое оборудование, которое практически полностью выработало свой ресурс. Все это нередко приводит к выходу этого оборудования из строя, аварийным отключениям и связанными с этим перебоим в электроснабжении. Однако замена такого оборудования на новое затруднено вследствие отсутствия экономической возможности, а эффективность планово-предупредительного ремонта не высока и требует периодического вывода оборудования из эксплуатации. Поэтому очевидно, что в такой ситуации необходим постоянный контроль за состоянием оборудования [1, 2, 3], что позволит производить его ремонт не по фиксированным, заранее установленным срокам, а по его фактическому состоянию. Таким образом, одним из важнейших путей повышения надежности и эффективности использования энергетического оборудования является внедрение средств его диагностирования.

Методы и средства реализации

Известно много различных методов неразрушающего контроля для оценки наличия неисправностей энергетического оборудования, которые используются в различных системах мониторинга их состояния [4 - 8]. Применение конкретного метода определяется

поставленными задачами. При этом для работающего оборудования, особенно для вращающегося, которое генерирует вибрации, наиболее эффективным и универсальным методом неразрушающего контроля является вибрационный контроль [9 - 11]. Он обеспечивает не только наблюдение за оборудованием и выявление его дефектов и отказов, в том числе и еще до их возникновения, но и позволяет получить информацию о тенденциях изменения различных параметров во времени, что позволяет оценить потенциальные риски и предпринять своевременные действия для предотвращения выхода оборудования из строя. Это объясняется тем, что значительная часть дефектов и неисправностей деталей, узлов и их кинематических связей вызывает дополнительные механические колебания оборудования, причем каждый дефект вызывает специфический спектр вибрации, что и позволяет корректно и точно выявить данный конкретный дефект.

Очевидно, что виброакустический контроль позволяет без разборки и вывода из процесса работы оценить состояние энергетического оборудования по косвенным признакам, а именно, по отклонению виброакустических показателей, зависящих от состояния его деталей и узлов, а также характера их взаимодействия, от нормативных значений. На практике, если необходимо контролировать лишь величину вибрации без определения ее причины, используются системы вибромониторинга. Если же необходимо выявить причины возникновения вибрации, то применяют системы вибродиагностики. Виброакустическое диагностирование может быть использовано для любого оборудования, при работе которого возникают вибрация и колебания. Следует отметить, что такая диагностика эффективна не только на стадии эксплуатации, но и в процессе производства отдельных деталей и узлов, а также для испытания оборудования при его изготовлении и после ремонта или модернизации.

Таким образом, применение систем технической вибродиагностики энергетического оборудования позволяет:

- обеспечить выявление неисправностей и предпосылок их возникновения, а также своевременно принимать меры по предотвращению развития неисправностей, предотвратив тем самым внезапный выход оборудования из строя;
- обеспечить значительный экономический эффект путем отказа от проведения контрольно-регламентных работ на исправном оборудовании;
- проводить целенаправленный ремонт или замену деталей и узлов с выявленными конкретными неисправностями, что обеспечит увеличение ресурса и надежности работы энергетического оборудования, а также повысит бесперебойность электроснабжения потребителей.

Как показывает статистика, периодическая вибродиагностика оборудования позволяет значительно (до 50%) сократить затраты на его обслуживание.

Следует отметить, что существует два принципа измерения вибрации: кинематический и динамический. При реализации кинематического принципа измеряют координаты точек объекта относительно выбранной неподвижной системы координат (измерение относительной вибрации), а при динамическом принципе параметры вибрации измеряют относительно искусственно созданной неподвижной системы отсчета, в большинстве случаев инерционного элемента, связанного с объектом через упругий подвес (измерение абсолютной вибрации). Кроме того, в зависимости от того, какую колебательную величину требуется измерять (виброперемещение, виброскорость или виброускорение), такие параметры колебательной системы, как масса инерционного элемента M , коэффициент демпфирования h , показатель затухания ε , относительное перемещение y корпуса датчика и инерционного элемента или частоту собственных колебаний системы ω_0 , должны удовлетворять определенным условиям. Например, если y пропорционально виброперемещению, то датчик работает в режиме виброметра, если y пропорционально виброскорости – то в режиме велосиметра, а если виброускорению – то в режиме акселерометра.

Вибрационный анализ позволяет выявить практически все неисправности, которые могут возникнуть в оборудовании. Для этого используют различные методы вибродиагностики механических узлов, описанные в [12 - 15].

Очевидно, что для получения диагностической информации о физических параметрах вибрации система контроля должна содержать соответствующий тип вибродатчика, эксплуатационные возможности и характеристики которого в значительной степени определяют эффективность виброакустического диагностирования в целом.

При виброакустическом диагностировании используются различные типы вибродатчиков, преобразующие механические колебания в электрический сигнал: пьезоэлектрические, индукционные, индуктивные, вихретоковые, емкостные,

пьезорезистивные и многие другие. При этом, в настоящее время широкое применение нашли лишь некоторые из них: индукционные (электродинамические) датчики, работающие в режиме виброметра и велосиметра; пьезоэлектрические датчики, работающие в режиме акселерометра; индуктивные и вихретоковые датчики, используемые для бесконтактного измерения относительных виброперемещений.

Конструктивно по виду движения чувствительного элемента вибродатчики (ВД) делятся на два класса: осевые и маятниковые. В ВД первого класса обеспечивается прямолинейное движение этого элемента, а в ВД второго класса – угловое. Как показал проведенный анализ технической литературы, наиболее перспективными являются ВД первого класса.

Особый интерес в вибродиагностике представляет низкочастотный диапазон измеряемых колебаний, которые характерны для виброперемещений, отражающих относительное смещение объекта или соответствующую деформацию. В этом случае наиболее эффективными являются вихретоковые датчики. Несмотря на то, что датчики такого типа известны уже давно, работы по их усовершенствованию и улучшению технико-экономических показателей проводятся в настоящее время весьма активно [16 - 21].

Все это показывает актуальность дальнейшего совершенствования вибродатчиков с улучшенными характеристиками и более широкими эксплуатационными возможностями для систем технической вибродиагностики энергетического оборудования

Разработка датчика виброперемещения для систем технической вибродиагностики

В основе принципа построения предлагаемого варианта ВД лежит физический принцип функционирования вихретокового преобразователя, который характеризуется тем, что источником внешнего поля, взаимодействующего с полем катушки, являются вихревые токи, возбуждаемые переменным полем самой катушки в электромагнитных массах (в специальных экранах или контролируемых изделиях, обладающих электропроводностью). Выходным сигналом ВД является напряжение, амплитуда которого пропорциональна вибрационному ускорению. При необходимости, интегрируя этот сигнал, можно получить значение скорости и перемещения объекта.

Особенности конструктивного исполнения предлагаемого ВД представлены на рис. 1, где 1 и 2 – ферритовые броневые сердечники; 3 – резьбовой ферритовый стержень (ФС); 4 и 5 – измерительные катушки; 6 – диэлектрическая втулка в виде тонкостенного цилиндра; 7 – электрод активации (ЭА) в виде металлического разрезного тонкостенного цилиндра; 8 – экран в виде металлического кольца, выполняющего функции инерционного элемента; 9 – упругий подвес в виде плоской мембраны из бериллиевой бронзы.

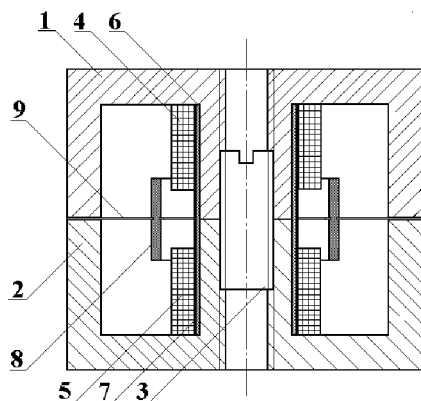


Рис. 1. Вариант конструкции вибродатчика

Fig. 1. Vibration sensor design option

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Конструктивные элементы 1, 2 и 3 в своей совокупности образуют разъемный магнитопровод ВД, на внутренней центральной части которого коаксиально соответственно располагаются измерительные катушки 4 и 5, диэлектрическая втулка 6 и электрод активации 7. При этом ферритовый резьбовой стержень 3, имеющий возможность микрометрических осевых перемещений относительно измерительных катушек 4 и 5, помимо центрирующей функции выполняет на стадии подготовки ВД к работе роль балансирующего элемента, влияющий на начальные параметры измерительных катушек 4 и 5. Инерционный элемент 8 в виде металлического экрана закреплен на упругом подвесе 9 и имеет возможность под действием вибраций совершать осевые перемещения относительно катушек 4 и 5.

Следует отметить, что упругий подвес 9 (рис. 2) выполнен в виде мембраны и является подвесом с направленным ходом инерционного элемента, где направляющие элементы являются частью самого подвеса. Упругий подвес жестко фиксируется на торцевой поверхности одного из броневых сердечников посредством трех установочных отверстий, что обеспечивает нейтральное пространственное положение экрана 8 относительно измерительных катушек 4 и 5.

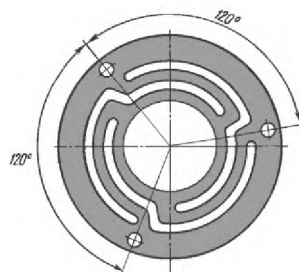


Рис. 2. Упругий подвес инерционного элемента Fig. 2. Elastic suspension of the inertial element

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Рассмотрим в самом общем виде работу предложенного варианта ВД, имеющего свои конструктивные особенности, которые заключаются в том, что нижний ряд обмотки каждой измерительной катушки выполняет роль второго электрода, который в совокупности с частью ЭА (первый электрод) образуют соответствующий конструктивный конденсатор связи для каждой измерительной катушки.

В этом случае переменный электрический потенциал φ_0 , подаваемый на ЭА от генератора возбуждения и изменяющийся по синусоидальному закону, индуцирует соответствующий переменный электрический потенциал φ_1^* и φ_2^* на витках нижнего ряда обмотки каждой измерительной катушки. Фактически к каждой электрической обмотке измерительной катушки прикладывается соответствующее гармоническое синусоидальное напряжение $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$, определяемые следующими соотношениями:

$$\dot{U}_1 = \varphi_1^* - \varphi_K; \quad \dot{U}_2 = \varphi_2^* - \varphi_K,$$

где $\varphi_K = 0$ – условный электрический потенциал на корпусе ВД.

При этом в каждой из электрических обмоток измерительной катушки возникает соответствующий электрический переменный ток. Посредством этих электрических токов во внутреннем пространстве ВД, ограниченном ферритовыми броневыми сердечниками 1 и 2, создаются соответствующие переменные магнитные поля, наводящее в металлическом кольце (экране), выполняющего функции инерционного элемента, вихревые токи. Эти вихревые токи, в свою очередь, возбуждают вторичные (переизлученные) переменные магнитные поля, инициирующие процесс взаимной индукции между соответствующей измерительной катушкой и экраном Э.

При нейтральном пространственном положении экрана Э эти процессы являются равно подобными, т.е. выполняется теорема Кирпичева-Гухмана, определяющая следующие условия подобия: 1 – подобные процессы должны быть качественно одинаковыми, т.е. описываться одинаковыми дифференциальными уравнениями и иметь одну физическую природу; 2 – условия однозначности подобных процессов должны быть одинаковыми, кроме численных значений постоянных, содержащихся в них; 3 – одноименные определяющие критерии подобных процессов должны иметь одинаковую численную величину.

В этом случае и с учетом того, что критерием подобия процессов взаимной индукции являются коэффициенты взаимной индукции между соответствующей измерительной катушкой и экраном, разница потенциалов между одноименными входными концами (они же информационные выходы) обмоток измерительных катушек будет равна нулю.

При осевом смещении экрана Э, вызванного вибрационными возмущениями, нарушается третье условие теоремы подобия процессов, что приводит к возникновению уже существенной разницы потенциалов между одноименными входными концами обмоток измерительных катушек. При этом характер смещения экрана Э будет адекватным образом отражаться в законе изменения разницы потенциалов между одноименными входными

концами обмоток измерительных катушек, в соответствии с которым в дальнейшем и определяются параметры вибрационного возмущения.

Для анализа особенностей функционирования ВД рассмотрим его электрическую схему замещения, показанную на рисунке 3.

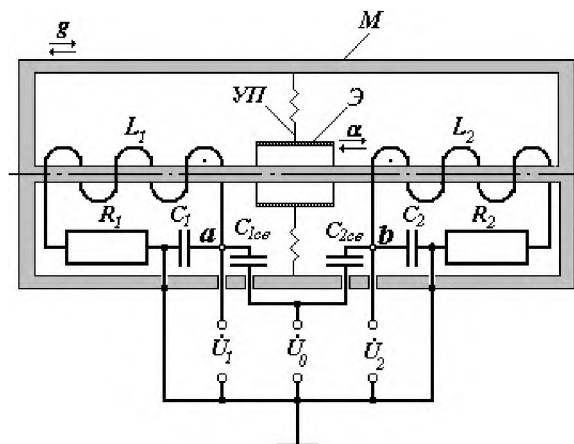


Рис. 3. Электрическая схема замещения ВД

Fig. 3. Electrical equivalent circuit of VD

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Здесь использованы следующие обозначения: УП – упругий подвес в виде мембраны; Э – металлический экран (инерционный элемент), на который воздействует виброускорение g ; M – магнитопровод ВД, образованный ферритовыми броневыми сердечниками; R_1 и R_2 – активные сопротивления обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек (ИК₁ и ИК₂); L_1 и L_2 – индуктивности обмоток соответственно ИК₁ и ИК₂; C_1 и C_2 – межвитковые емкости обмоток соответственно ИК₁ и ИК₂; $\vec{U}_0$ – комплексная величина гармонического напряжения питания, которое подводится к электроду активации; $\vec{U}_1$ и $\vec{U}_2$ – напряжения, снимаемые с одноименных концов обмоток соответственно ИК₁ и ИК₂; C_{1cv} и C_{2cv} – емкостные элементы связи измерительных катушек, через которые поступает напряжение питания $\vec{U}_0$ соответственно на ИК₁ и ИК₂.

Следует отметить, что C_{1cv} и C_{2cv} конструктивно условно являются конденсаторами с паразитными емкостями, которые образованы металлическим электродом активации 7 (рис. 1) с первыми нижними рядами проволочных обмоток соответственно ИК₁ и ИК₂ [20, 21]. Из рис. 3 следует, что ДВ фактически является одинарным индуктивно-емкостным мостом, представляющим собой четырехплечевую схему, у которой в плечах установлены емкостные (C_{1cv} и C_{2cv}) и индуктивные элементы (L_1 и L_2).

Обмотки ИК₁ и ИК₂ с индуктивностями соответственно L_1 и L_2 фактически включены в измерительную мостовую схему, где через ее соответствующую диагональ подается напряжение питания $u_0 = U_{0max} \times \sin \omega t$ (комплексное значение $\vec{U}_0$ и циклическая частота возбуждения ω), а выходные сигналы регистрируются через электрические узлы «а» и «б» измерительной диагонали относительно корпуса в виде соответствующих напряжений $\vec{U}_1$ и $\vec{U}_2$. В этом случае измеряемую величину можно определять по значению напряжения $\Delta \vec{U} = \vec{U}_1 - \vec{U}_2$ в измерительной диагонали моста, который по своей сути является неравновесным измерительным мостом.

Для существующей взаимосвязи между измерительной катушкой ИК₁ и экраном Э в соответствии со вторым законом Кирхгофа можем записать следующую систему аналитических выражений [22, 23]:

$$\begin{cases} \vec{U}_0 = \vec{I}_1^* \times \left(R_1 + j \times \omega \times L_1 - j \times \frac{1}{\omega \times C_{1cv}} \right) - j \times \omega \times M_1 \times \vec{I}_{1em}; \\ j \times \omega \times M_1 \times \vec{I}_1^* - (r_0 + j \times \omega \times L_0) \times \vec{I}_{1em} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где $\vec{I}_1^*$ – комплексная величина тока в измерительной катушке ИК₁ при смещенном состоянии экрана Э относительно его нейтрального положения; $\vec{I}_{1em}$ – комплексная величина вихревого тока, наводимого электромагнитным полем катушки ИК₁ в экране Э;

M_1 – коэффициент взаимной индукции между измерительной катушкой $ИК_1$ и экраном $\mathcal{E}$;

$L_0 = \mu_0 \times \frac{d_0}{2} \times \left(\ln \frac{8}{l_0} \times \frac{d_0}{2} - \frac{1}{2} \right)$ и r_0 – индуктивность и активное сопротивление

элементарного витка (экрана $\mathcal{E}$); μ_0 – магнитная проницаемость материала элементарного витка; d_0 и l_0 – соответственно диаметр и длина элементарного витка; $C_{1cs} = \varepsilon_0 \times \varepsilon_1 \times 2\pi \times l_c / \ln(r^*/r)$ – электрическая емкость конденсатора связи измерительной катушки $ИК_1$, l_c – длина части цилиндрического электрода внутри измерительной катушкой $ИК_1$, r – условный радиус цилиндрического электрода, r^* – внутренний радиус измерительной катушки $ИК_1$.

Подставляя $\dot{I}_{1em}$, полученное из второго уравнения системы (1), в первое уравнение, получаем:

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_1^* \times \left[R_1 + \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times r_0 + j \times \left(\omega \times L_1 - \frac{1}{\omega \times C_{1cs}} - \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0 \right) \right], \quad (2)$$

где $Z_0 = \sqrt{r_0^2 + \omega^2 \times L^2}$ – модуль комплексного сопротивления экрана $\mathcal{E}$.

Исходя из того, что элементы мостовой измерительной в схемы в виде соответствующих индуктивно-емкостных плеч функционируют в режиме последовательного резонанса, т.е. $\omega \times L_1 = (\omega \times C_{1cs})^{-1}$ и $\omega \times L_2 = (\omega \times C_{2cs})^{-1}$, выражение (2) можно представить в следующем виде:

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_1^* \times \left(R_1 + \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times r_0 - j \times \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0 \right). \quad (3)$$

Учитывая, что в режиме последовательного резонанса $\dot{I}_1^* \rightarrow \max$, для напряжения на выводных концах $ИК_1$ справедлива запись вида:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 = \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_1^*} \times R_1 &= \frac{\dot{U}_0}{R_1 + \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times r_0 - j \times \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0} \times R_1 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \dot{U}_0 \times R_1 \times \frac{R_1 + \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times r_0}{\left(R_1 + \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times r_0 \right)^2 + \left(\frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0 \right)^2} + \rightarrow \\ &\rightarrow + \dot{U}_0 \times R_1 \times j \times \frac{\frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0}{\left(R_1 + \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times r_0 \right)^2 + \left(\frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0 \right)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

После несложных математических преобразований выражение (4) можно привести к виду:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \frac{\dot{U}_0 \times R_1}{Z_0^2} \times \frac{R_1 \times Z_0^2 + \omega^2 \times M_1^2 \times r_0}{\left(R_1 + \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times r_0 \right)^2 + \left(\frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0 \right)^2} + \rightarrow \\ &\rightarrow + \frac{\dot{U}_0 \times R_1}{Z_0^2} \times j \times \frac{\omega^2 \times M_1^2 \times \omega \times L_0}{\left(R_1 + \frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times r_0 \right)^2 + \left(\frac{\omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0 \right)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

В связи с тем, что значения $\omega^2 \times M_1^2$ незначительны, выражение (5) легко трансформируется к виду:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_0 + \frac{\dot{U}_0 \times \omega^2 \times M_1^2}{Z_0^2 \times R_1} \times (r_0 + j \times \omega \times L_0) \quad (6)$$

В свою очередь, для существующей взаимосвязи между измерительной катушкой ИК₂ и экраном Э можем записать систему соответствующих аналитических выражений:

$$\begin{cases} \dot{U}_0 = \dot{I}_2^* \times \left(R_2 + j \times \omega \times L_2 - j \times \frac{1}{\omega \times C_{2св}} \right) - j \times \omega \times M_2 \times \dot{I}_{2em}; \\ j \times \omega \times M_2 \times \dot{I}_2^* - (r_0 + j \times \omega \times L_0) \times \dot{I}_{2em} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

где $\dot{I}_2^*$ - комплексная величина тока в измерительной катушке ИК₂ при смещенном состоянии экрана Э относительно его нейтрального положения; $\dot{I}_{2em}$ - комплексная величина вихревого тока, наводимого электромагнитным полем катушки ИК₂ в экране Э; M_2 - коэффициент взаимной индукции между измерительной катушкой ИК₂ и экраном Э.

Тогда, аналогично выражению (5) для напряжения на выводных концах ИК₂ можем записать:

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_0 \times R_2}{Z_0^2} \times \frac{R_2 \times Z_0^2 + \omega^2 \times M_2^2 \times r_0}{\left(R_2 + \frac{\omega^2 \times M_2^2}{Z_0^2} \times r_0 \right)^2 + \left(\frac{\omega^2 \times M_2^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0 \right)^2} + \rightarrow \\ \rightarrow + \frac{\dot{U}_0 \times R_2}{Z_0^2} \times j \times \frac{\omega^2 \times M_2^2 \times \omega \times L_0}{\left(R_2 + \frac{\omega^2 \times M_2^2}{Z_0^2} \times r_0 \right)^2 + \left(\frac{\omega^2 \times M_2^2}{Z_0^2} \times \omega \times L_0 \right)^2} \end{aligned} \quad (8)$$

Для окончательного варианта записи выражения (8) будем иметь:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_0 + \frac{\dot{U}_0 \times \omega^2 \times M_2^2}{Z_0^2 \times R_2} \times (r_0 + j \times \omega \times L_0) \quad (9)$$

Разностное напряжение на измерительной диагонали измерительного моста с учетом (6) и (9) будет определяться выражением:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_0 \times \omega^2}{Z_0^2 \times R} \times r_0 \times (M_1^2 - M_2^2) + j \times \frac{\dot{U}_0 \times \omega^3}{Z_0^2 \times R} \times L_0 \times (M_1^2 - M_2^2), \quad (10)$$

где $M_1^2 = k_1^2 \times L_1 \times L_0$; $M_2^2 = k_2^2 \times L_2 \times L_0$; k_1 и k_2 - коэффициенты связи между экраном Э и, соответственно, измерительной катушкой ИК₁ и измерительной катушкой ИК₂; $L_1 = L_2 = L = \mu \times w^2 \times l / S$; μ - магнитная проницаемость магнитопровода; w , l и S - соответственно количество витков, длина измерительных катушек и площадь их внутреннего сечения.

Обобщенный вариант конструкции ВД представлен на рисунке 4.

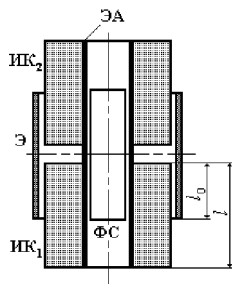


Рис. 4. Обобщенный вариант конструкции ВД

Fig. 4. Generalized version of the design of the VD

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Если учесть размерные параметры основных элементов ВД, то для рассматриваемого случая коэффициенты связи k_1 и k_2 являются функциями линейного перемещения δ экрана Э относительно своего нейтрального положения:

$$k_1 = k_0 \times (l - l_0 - \delta) = k_0 \times (l^* - \delta) \text{ и } k_2 = k_0 \times (l - l_0 + \delta) = k_0 \times (l^* + \delta), \quad (13)$$

где $l^* = (l - l_0)$ - часть длины измерительной катушки внутри экрана Э при его нейтральном положении, l_0 - часть длины измерительной катушки вне экрана Э при его нейтральном положении; k_0 - конструктивный коэффициент.

После соответствующих преобразований с учетом (11) выражение (12) трансформируется к следующему виду:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = -\frac{\dot{U}_0 \times \omega^2}{Z_0^2 \times R} \times r_0 \times k_0 \times L \times L_0 \times 4 \times I^* \times \delta - j \times \frac{\dot{U}_0 \times \omega^3}{Z_0^2 \times R} \times L \times L_0^2 \times k_0 \times 4 \times I^* \times \delta. \quad (14)$$

В обобщенном варианте уравнение (14) можно представить в виде следующего выражения:

$$\Delta \dot{U} = \text{Re}(\Delta \dot{U}) - j \cdot \text{Im}(\Delta \dot{U}). \quad (15)$$

Из анализа выражения (14) следует, что наиболее чувствительным компонентом $\Delta \dot{U}$ к измеряемому параметру δ является его мнимая составляющая $\text{Im}(\Delta \dot{U})$ (15). Поэтому для регистрации мнимой составляющей выходного напряжения измерительного моста необходимо использовать квадратурный детектор (КД) с опорным напряжением, сдвинутым по фазе на $\pi/2$ относительно фазы напряжения питания моста $\dot{U}_0$.

Если при этом вектор опорного напряжения КД соответствующим образом совместить с осями координат на плоскости $\Delta \dot{U}$, то можно записать:

$$\Delta U_{Im} = |\Delta \dot{U}| \times \sin(\arg \Delta \dot{U}). \quad (16)$$

Функциональное уравнение для КД в общем случае можно представить в следующем виде:

$$u_{ВВХ}(t) = \Theta_{КД} \times u_{ВХ}(t) \times u_{ОП}(t), \quad (17)$$

где $u_{ВВХ}(t)$ – выходная величина КД; $u_{ВХ}(t)$ – измеряемая величина; $u_{ОП}(t)$ – вектор коммутации (периодическая величина); $\Theta_{КД}$ – постоянный коэффициент, определяемый параметрами КД.

Следует отметить, что опорный сигнал, создающий вектор коммутации, поступает от того же источника, что и измеряемый сигнал.

Воспользуемся релейным однополупериодным типом КД, у которого вектор коммутации определяется выражением вида:

$$u_{ОП}(t) = 0,5 \times U_{ОП_{max}} \times (1 + \text{sign} \sin \omega t) \quad (18)$$

Тогда, в соответствии с (17) и (18) можем для ΔU_{Im} записать выражение:

$$\Delta U_{Im} = -4 \times U_{0_{max}} \times U_{ОП} \times \Theta_{КД} \times \frac{Q \times Q_0}{(1 + Q_0)} \times L \times k_0 \times I^* \times \delta, \quad (19)$$

где $Q = \frac{\omega L}{R}$ – добротность измерительных катушек $ИК_1$ и $ИК_2$; $Q_0 = \frac{\omega L_0}{r_0}$ – добротность экрана $\mathcal{E}$.

После введения соответствующих определений и с учетом того, что в общем случае $\delta = F(t)$, выражение (19) можно представить в следующем виде:

$$\Delta U_{Im} = U_{ввх}(t) = -4 \times \Theta_{КД} \times \Theta_{КП} \times \Theta_{РФ} \times \delta(t), \quad (20)$$

где $\Theta_{КП} = 4 \times \frac{Q \times Q_0}{(1 + Q_0)} \times L \times k_0 \times I^*$ – постоянный коэффициент, определяемый конструктивными параметрами ДВ; $\Theta_{РФ} = 4 \times U_{0_{max}} \times U_{ОП}$ – постоянный коэффициент, определяемый параметрами режима функционирования ДВ.

Из уравнения (20) определяем искомый параметр $\delta(t)$:

$$\delta(t) = -0,25 \times U_{ввх}(t) \times (\Theta_{КД} \times \Theta_{КП} \times \Theta_{РФ})^{-1}. \quad (21)$$

Измерительное устройство (ИУ) для систем вибродиагностики, реализующее соотношение (21), функционально состоит из первичного измерительного преобразователя (ПИП) и вторичного измерительного преобразователя (ВИП) (рис. 5).

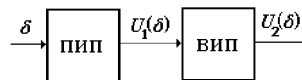


Рис. 5. Блок-схема измерительного устройства для систем вибродиагностики

Fig. 5. Block diagram of a measuring device for vibration diagnostic systems

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Вариант схемотехнического решения функционального модуля ПИП для данного измерительного устройства представлен рисункеб.

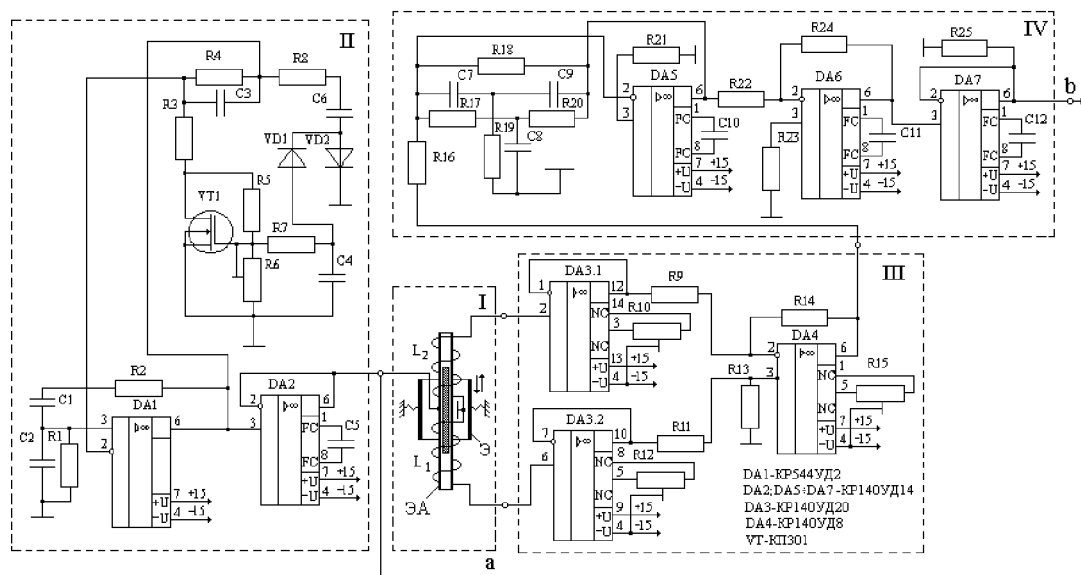


Рис.6. Схемотехническое решение первичного измерительного преобразователя

Fig. 6. Circuit design of the primary measuring transducer

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Здесь I – датчик виброперемещений; II – генератор синусоидального сигнала, собранного на DA1, DA2; III – входной дифференциальный измерительный усилитель, собранного на DA3, DA4; IV – аналогового фильтра, состоящего из узкополосного фильтра, выполненного на базе DA5, широкополосного усилителя DA6 и буферного усилителя DA7.

Источник синусоидального напряжения собран на основе ОУ DA1 по схеме RC-генератора с использованием моста Вина (C1, C2, R2, R3). Для получения гармонических колебаний с малыми искажениями используется инерционно-нелинейная цепь отрицательной обратной связи ОУ. Степень стабилизации амплитуды реализована на полевом транзисторе VT1, которым управляет постоянная составляющая, пропорциональная амплитуде выходного сигнала. С увеличением амплитуды уменьшается проводимость полевого транзистора, что приводит к уменьшению коэффициента усиления ОУ и, тем самым, к уменьшению амплитуды выходного сигнала. Установившееся значение амплитуды выходного сигнала равно 200 мВ, а его частота – 16 кГц. Погрешность стабилизации составляет менее 1%, а коэффициент гармоник не более 0,1%.

Синусоидальный сигнал через повторитель напряжения на ОУ DA2 поступает на электрод активации (ЭА) ВД. С выхода измерительного моста, плечевыми элементами которого являются согласно включенные электрические обмотки ИК₁ и ИК₂, имеющие среднюю точку соединения и соответственно индуктивности L_1 и L_2 , электрический сигнал, поступает на высокоомный вход дифференциального усилителя, собранного на ОУ DA3 и DA4.

Узкополосный активный фильтр собран на ОУ DA5 и частотно-избирательной RC цепи, выполненной в виде двойного Т-образного моста. Резонансная частота двойного Т-образного моста соответствует частоте синусоидального напряжения питающего RC-генератора и равна 12 кГц. Добротность моста составляет $Q=30$. Двойной Т-образный мост (C10÷C12, R21÷R24), включенный в обратную связь ОУ DA5, на частоте резонанса будет иметь сравнительно большое сопротивление, что обеспечивает в свою очередь ОУ наибольший коэффициент передачи. Данное схемное решение активного фильтра позволяет эффективно выделять информационный сигнал той же частоты, что и рабочая частота RC-генератора. Сигнал с выхода активного фильтра усиливается широкополосным усилителем DA6 с коэффициентом передачи $K=10$ и через буферный усилитель DA7 в виде сигнала «б» поступает на вход последующих электронных блоков.

На рис. 7 представлен вариант схемотехнического решения функционального модуля ВИП.

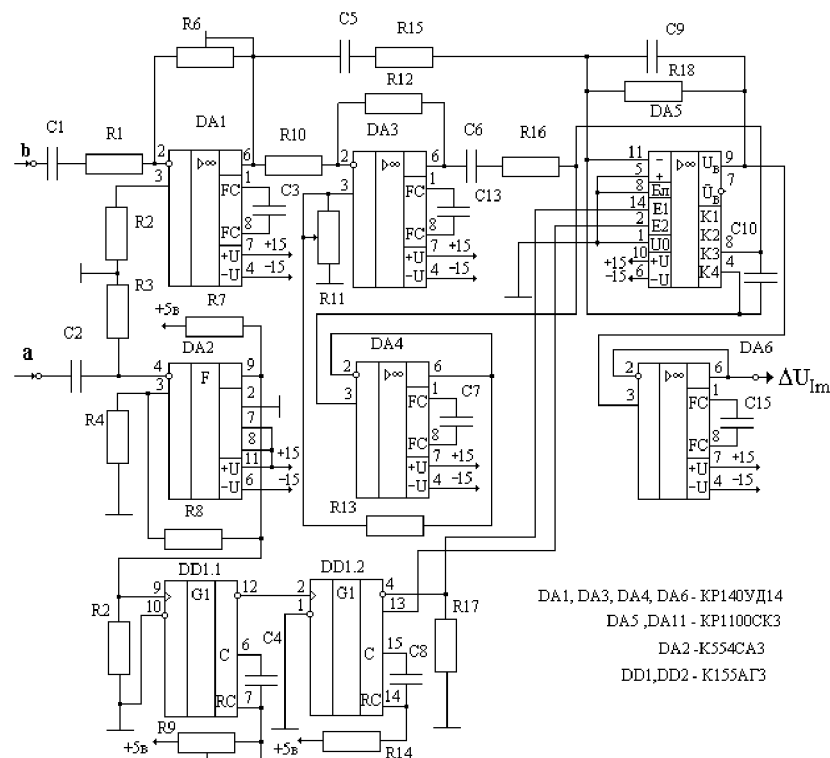


Рис. 7. Схемотехническое решение вторичного измерительного преобразователя

Fig. 7. Circuit design of the secondary measuring transducer

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

ВИП состоит из квадратурного детектора информационных сигналов, собранного на ОУ DA1, DA3, DA4, DA5; выходного буферного усилителя DA6; формирователя квадратурного опорного напряжения для КД, выполненного соответственно на компараторе DA2, и элементах DD1.1, DD1.2. Формирование исходного опорного напряжения в виде меандра для КД реализовано на компараторе DA2, путем соответствующего преобразования синусоидального сигнала «а» от генератора низковольтного высокочастотного синусоидального напряжения. Включение компаратора DA2 по приведенной схеме обеспечивает скорость нарастания выходного напряжения до 16 В/мкс, а порог срабатывания при этом составляет 3 мВ. Необходимая фаза квадратурного опорного напряжения задается фазовращателями, выполненными соответственно на одновибраторах DD1.1, DD2.2 путем регулировки сопротивлений R9.

Фазовращатель обеспечивает возможность регулировки фазы своего выходного сигнала (вида меандр) относительно входного от 0^0 до 180^0 . При этом формируются опорное напряжение необходимой фазы, которое и обеспечивают соответствующий релейный режим работы КД. В качестве детектора для КД используется специализированный ОУ DA5 со встроенными четырехканальными аналоговыми коммутаторами. Противофазно работающие последовательно-параллельные ключи этих коммутаторов позволяют работать КД с достаточно малыми сигналами, напряжение которых не превышает 0,5 В. КД обладает следующими техническими характеристиками: частотный диапазон 10 Гц ÷ 100 кГц; динамический диапазон 100 дБ; подавление некогерентного шума 70дБ; порог чувствительности 5 мкВ до 10 кГц и 20 мкВ до 100 кГц. Продетектированный информационный сигнал, являющийся квадратурной составляющей информационного сигнала через соответствующий выходной буферный усилитель DA6 в виде сигнала ΔU_{lm} поступает для дальнейшей обработки на вход информационно-вычислительного блока.

Следует отметить, что для линейного ВД уравнение динамического равновесия для его чувствительного элемента (экран) имеет следующий вид [24]:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + 2 \times \omega_0 \times \beta \times \frac{d\delta}{dt} + \omega_0^2 \times \delta = -g, \quad (22)$$

где g – ускорение перемещения корпуса ВД в абсолютной системе координат; $\omega_0 = \sqrt{W/M}$ – собственная циклическая частота ВД; W – жесткость упругих элементов, M – масса инерционного элемента; β – степень затухания.

Подставляя выражение (21) в уравнение (22), получим:

$$g(t) = 0,25 \times (\Theta_{\kappa\Delta} \times \Theta_{\kappa\Gamma} \times \Theta_{P\Phi})^{-1} \times \left[\frac{d^2 U_{\text{вбх}}(t)}{dt^2} + 2 \times \omega_0 \times \beta \times \frac{dU_{\text{вбх}}(t)}{dt} + \omega_0^2 \times U_{\text{вбх}}(t) \right] \quad (23)$$

В обобщенном варианте это уравнение имеет следующий вид:

$$g(t) = 0,25 \times (\Theta_{\kappa\Delta} \times \Theta_{\kappa\Gamma} \times \Theta_{P\Phi})^{-1} \times [\dot{U}_\delta + 2 \times \omega_0 \times \beta \times \dot{U}_v + \omega_0^2 \times \dot{U}_\alpha], \quad (24)$$

где $\dot{U}_\delta$ – сигнал, пропорциональный относительному перемещению « δ » корпуса ВД и его инерциального элемента; $\dot{U}_v$ и $\dot{U}_\alpha$ – сигналы, пропорциональные соответственно скорости « v » и ускорению « α » относительного перемещения корпуса ВД и его инерциального элемента.

Из анализа выражений (23) и (24) следует вывод о наличии возможности регистрации виброускорения путем решения полученного дифференциального уравнения с помощью аналоговых аппаратных средств. Три слагаемых правой части уравнения (24) формируются соответственно вибродатчиком (сигнал $U = \dot{U}_\delta$), первым дифференцирующим устройством (сигнал $U' = \dot{U}_v$) и вторым дифференцирующим устройством (сигнал $U'' = \dot{U}_\alpha$), последовательно включенными с вибродатчиком.

Вариант аппаратного решения системы технической вибродиагностики энергетического оборудования, позволяющей регистрировать виброускорение (ускорение перемещения корпуса ВД) в виде упрощенной блок-схемы представлен на рис. 8, где 1 – вибродатчик с измерительным каналом и коэффициентом преобразования S_δ ; 2 и 3 – дифференцирующие устройства с коэффициентами преобразования соответственно S_v и S_α ; 4 – суммирующее устройство; 5 – интегрирующее устройство с коэффициентом преобразования S [25]. На вход ВД (блок 1) поступает вибровозмущение в виде относительного перемещения δ корпуса ВД и инерционного элемента, которое преобразуется ВД в величину электрического напряжения $U = \delta \times S_\delta$. В свою очередь сигнал с блока 1 преобразуется блоком 2 в электрическое напряжение $U' = \delta' \times S_v$, которое в последующем преобразуется в напряжение $U'' = \delta'' \times S_\alpha$. После соответствующего суммирования указанных электрических сигналов блоком 4, преобразованный уже суммарный сигнал преобразуется блоком 5 в величину, соотнесенную к искомому параметру g , т.е. к ускорению перемещения корпуса ВД в абсолютной системе координат.

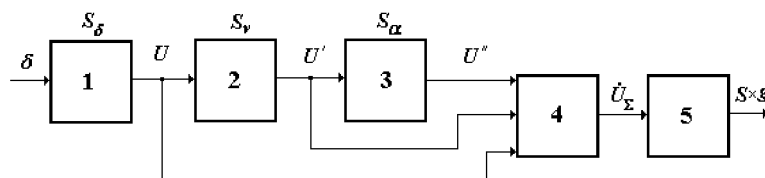


Рис. 8. Блок-схема аппаратного решения системы технической вибродиагностики энергетического оборудования

Fig. 8. Block diagram of the hardware solution for the system of technical vibration diagnostics of power equipment

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

С учетом сделанных замечаний уравнение (22) можно представить в следующем виде:

$$\frac{1}{S} \times \int \left[\frac{1}{S_\alpha} \times U'' + \frac{2 \times \omega_0 \times \beta}{S_v} \times U' + \frac{\omega_0^2}{S_\delta} \times U \right] \times dt = -g. \quad (25)$$

Полученное уравнение отражает существующую возможность аппаратной реализации алгоритма определения ускорения перемещения корпуса ВД в абсолютной системе координат.

Заключение

Разработанный ВД обладает перед существующими аналогами следующими преимуществами:

1. повышенной чувствительностью, т.к. функционирует в режиме собственных последовательных резонансов измерительных катушек;

2. технологичностью и простотой конструкции, которые обеспечиваются отсутствием дополнительных внешних электронных элементов и использованием стандартных видов магнитопровода (ферромагнитные броневые сердечники);

3. повышенной надежностью функционирования, обусловленной высокой температурной и временной стабильностью рабочих характеристик за счет использования своих конструктивных особенностей в виде паразитной емкостной связи;

4. расширенными функциональными возможностями, которые легко реализуются, например, благодаря использованию инерционного элемента в виде замкнутого электропроводящего кольца и простой процедуры замены упругого подвеса в виде мембраны на торсионный подвес, позволяющей регистрировать уже и угловые перемещения.

5. сравнительно высокой точностью преобразования за счет повышенной помехозащищенности;

6. высокими потенциальными возможностями адаптации к различного рода техническим задачам и в случае необходимости к дальнейшей глубокой модернизации.

Совместное использование предлагаемого варианта ВД, микропроцессорных и цифровых технологий создаст необходимые условия для разработки в дальнейшем более совершенной виброакустической портативной системы, ориентированной на алгоритмическую обработку и детальный анализ полученной информации, что значительно повысит надежность оперативной оценки энергетического оборудования, в котором могут развиваться те или иные опасные процессы.

Кроме того, в связи с тем, что контролируемое оборудование работает рядом с другим работающими механическими устройствами, являющимися источниками вибрации, в контролируемом оборудовании возникают дополнительные внутренние механические напряжения, приводящие к появлению дополнительных шумовых полей звукового диапазона частот ($10 \div 10^4$ Гц). Поэтому возможно эффективное применение предлагаемого варианта ВД также для регистрации интенсивности и частотного спектра уже этих шумовых полей виброакустической эмиссии, что, в свою очередь, позволит получить ценную дополнительную информацию.

Следует отметить, что разработанный датчик с токовихревым преобразованием может быть использован не только для решения задач вибрационного контроля энергетического оборудования при его изготовлении, монтаже, наладке, ремонте или исследованиях, но и в качестве вибродатчика в системах технической диагностики любых других машин и механизмов, работа которых сопровождается возникновением механических колебаний и вибраций. Кроме того, он может использоваться также для задач спектральной сейсморазведки и задач инженерной геологии [26-29].

Литература

1. Басманов В.Г. Современные методы диагностики объектов электроэнергетики. Киров: ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2013. 136 с.
2. Белкин А.П., Степанов О.А. Диагностика теплоэнергетического оборудования. СПб.: Лань, 2018. 240 с.
3. Привалов Е.Е. Диагностика электроэнергетического оборудования. М.: Директ-Медиа, 2015. 229 с.
4. Михеев Г.М. Цифровая диагностика высоковольтного электрооборудования. М.: ДМК, 2015. 298 с.
5. Васенин А.Б. Анализ методов диагностики и прогнозирования состояния ответственных энергетических установок // Химическая техника, 2018, № 8. С. 13-18.
6. Павленко С. В., Силин Н. В., Игнатъев Н. И. Применение прогрессивных методов диагностики высоковольтного энергетического оборудования // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, 2018, Т. 8, № 1. С. 92-101.
7. Валеев А.Р., Ташбулатов Р.Р., Харрасов Б.Г., Ганиева И.И. Диагностика промышленного оборудования и локализация дефектов с использованием совмещенного анализа тензометрического и вибрационного спектров // Noise Theory and Practice. 2021. Т. 7. № 2 (24). С. 83-92.
8. Куменко А. И., Токаев А. С. Системы мониторинга и диагностики технического состояния турбоагрегатов ТЭС и АЭС: состояние и предложения по совершенствованию // Энергетик. 2020, № 10. С. 21-25.
9. Ступин О.А. Вибрационный метод диагностики, как современный способ неразрушающего контроля и выявления неисправностей технологических машин и оборудования // В сборнике: Чтения академика В. Н. Болтинского. 2022. С. 103-109.

10. Daniel J. Inman. Vibration with Control. John Wiley & Sons Ltd, England. 2006. 388 p.
11. Митрофанов С.В., Сташкевич А.С. Вибродиагностика энергетического оборудования. Перспективы развития и оптимизация вибродиагностической технологии. Оренбург: ООО ИПК «Университет». 2013. С. 301 – 304.
12. Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б. Диагностика технологических систем. Томск: Изд-во ТПУ, 2014. 128 с.
13. Karimi H. (Ed.) Vibration Control and Actuation of Large-Scale Systems. Academic Press, 2020. 398 p.
14. Васильев В.А., Ницкий А.Ю., Ерпалов А.В., Белоусова С.А. МЭМС-технологии и вибродиагностика энергетического оборудования ТЭС // Электрические станции. 2019. № 4 (1053). С. 52-56.
15. Babak, V.P., Babak, S.V., Myslovych, M.V., Zaporozhets, A.O., Zvaritch, V.M. Principles of Construction of Systems for Diagnosing the Energy Equipment. Diagnostic Systems For Energy Equipments Studies in Systems, Decision and Control, 2020, vol 281. p. 1-22.
16. Guo A. A Vibration Sensor Design Research. Sensors & Transducers, Vol. 169, Issue 4, April 2014, pp. 228-234.
17. Мелентьев В.В., Масленников Е.И., Порошин К.Г., Шибанов О.В. Научное датчик для вибродиагностики на базе технологии МЭМС и RFID // Научные технологии в машиностроении, 2017. № 6 (72). С. 30-33.
18. Collette C., Matichard F. Vibration control of flexible structures using fusion of inertial sensors and hyper-stable actuator-sensor pairs. Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2014) and International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics (USD2014). Belgium, 2014. pp. 1073-1084.
19. Xue X., Dong Y., Wu X. Motion Induced Eddy Current Sensor for Non-Intrusive Vibration Measurement // IEEE Sensors Journal, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 735-744.
20. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмшин В.Р. Электродно-индуктивный вибродатчик с емкостной связью // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 39-49.
21. Брякин И.В., Бочкарев И.В. Датчик виброперемещений для систем мониторинга состояния конструктивных элементов высоковольтных линий электропередач // Известия Вузов. Проблемы энергетики, 2022, Т. 24, № 4. – С. 63-76.
22. Федотов А.В. Теория и расчет индуктивных датчиков перемещений для систем автоматического контроля // Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 176 с.
23. Faria J. A. B. Electromagnetic Foundations of Electrical Engineering. John Wiley & Sons, Ltd. 2008. 420 p.
24. Костюков В.Н., Науменко А.П., Бойченко С.Н., Тарасов Е.В. Основы виброакустической диагностики машинного оборудования. Омск: НПЦ Динамика, 2007. 286 с.
25. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R. Acoustic Emission Probe for Power Line Structure Diagnostic Systems // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2022. pp. 108-113.
26. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка. Тверь: Изд-во АИС, 2006. 744 с.
27. Collette C., Carmona-Fernandez P., Janssens S., Artoos K., Guinchard M., Hauviller C. Review of sensors for low frequency seismic vibration // ATS/Note/2011/001 (TECH) 2011. Pp. 1-21.
28. Брякин, И.В. Универсальный сейсморегистратор // Проблемы автоматики и управления. – Бишкек: Илим. 2009. – №1. – С.111–120
29. Robein Etienne. Seismic Imaging: A Review of the Techniques, their Principles, Merits and Limitations. EAGE Publications, Netherlands, 2010. 244 p.

Авторы публикации

Брякин Иван Васильевич – д-р техн. наук, заведующий лабораторией «Информационно-измерительные системы», Институт машиноведения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской республики, г. Бишкек, E-mail: bivas2006@vandex.ru.

Бочкарев Игорь Викторович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика», Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек. E-mail: elmech@mail.ru.

References

1. Basmanov V.G. *Modern methods for diagnosing electric power facilities*. Kirov: FGBOU VPO «VyatGU», 2013. 136 p.
2. Belkin AP, Stepanov OA. *Diagnostics of heat power equipment*. St. Petersburg: Lan, 2018. 240 p.
3. Privalov EE. *Diagnostics of electric power equipment*. M.: Direct-Media, 2015. 229 p.
4. Mikheev G.M. *Digital diagnostics of high-voltage electrical equipment*. M.: DMK, 2015. 298 p.
5. Vasenin AB. Analysis of methods for diagnosing and predicting the state of critical power plants. *Chemical Engineering*, 2018;8:13-18.
6. Pavlenko SV, Silin NV, Ignatiev NI. Application of progressive methods for diagnosing high-voltage power equipment. *Science and technology of pipeline transportation of oil and oil products*. 2018;8(1):92- 101.
7. Valeev AR, Tashbulatov RR, Kharrasov BG, et al. Diagnostics of industrial equipment and localization of defects using combined analysis of tensometric and vibration spectra. *Noise Theory and Practice*. 2021;7:2 (24):83-92.
8. Kumenko AI, Tokaev AS. Systems for monitoring and diagnosing the technical condition of turbine units at TPPs and NPPs: state and proposals for improvement. *Energetik*. 2020;10:21-25
9. Stupin OA. *Vibration diagnostic method as a modern method of non-destructive testing and troubleshooting of technological machines and equipment*. In the collection: Readings of Academician V. N. Boltinsky. 2022, pp. 103-109.
10. Daniel J. Inman. *Vibration control*. John Wiley & Sons Ltd, England. 2006. 388 rubles.
11. Mitrofanov SV, Stashkevich AS. *Vibrodiagnostics of power equipment. Development prospects and optimization of vibrodiagnostic technology*. Orenburg: LLC IPK «Universitet», 2013. P. 301 - 304.
12. Gavrilin AN, Moizes BB. *Diagnostics of technological systems*. Tomsk: Publishing House of TPU, 2014. 128 p.
13. Karimi H. (Ed.) *Vibration Control and Actuation of Large-Scale Systems*. Academic Press, 2020. 398 p.
14. Vasil'ev VA, Nitskii AYU, Erpalov AV, et al. MEMS-technologies and vibration diagnostics of power equipment of thermal power plants. *Elektricheskie stantsii*. 2019;4 (1053):52-56.
15. Babak VP, Babak SV, Myslovykh MV, et al. *Principles of Construction of Systems for Diagnosing the Energy Equipment*. Diagnostic Systems For Energy Equipments Studies in Systems, Decision and Control, 2020, vol 281. p. 1-22. doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_1.
16. Guo AA. Vibration Sensor Design Research. *Sensors & Transducers*. 2014;169(4):228-234.
17. Melentiev VV, Maslennikov EI, Poroshin KG, et al. *Science-intensive sensor for vibration diagnostics based on MEMS and RFID technology*. Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2017;6(72):30-33.
18. Collette C, Matichard F. *Vibration control of flexible structures using fusion of inertial sensors and hyper-stable actuator-sensor pairs*. Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2014) and International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics (USD2014). Belgium, 2014, pp. 1073-1084.
19. Xue X, Dong Y, Wu X. *Motion Induced Eddy Current Sensor for Non-Intrusive Vibration Measurement*. IEEE Sensors Journal, 2020;20(2):735-744. doi: 10.1109/JSEN.2019.2943931.
20. Bryakin IV, Bochkarev IV, Khramshin VR. Electrode-inductive vibration sensor with capacitive coupling. *Electrotechnical systems and complexes*. 2021;4(53):39-49. doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-39-49.
21. Bryakin IV, Bochkarev IV. Vibration displacement sensor for monitoring systems of the state of structural elements of high-voltage power lines. *Izvestiya Vuzov. Problems of Energy*, 2022;24(4):63-76. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-63-76.
22. Fedotov AV. *Theory and calculation of inductive displacement sensors for automatic control systems*. Omsk: Publishing House of OmGTU, 2011. 176 p.
23. Faria JAB. *Electromagnetic Foundations of Electrical Engineering*. John Wiley & Sons Ltd. 2008. 420 rubles.
24. Kostyukov VN, Naumenko AP, Boichenko SN, et al. *Fundamentals of vibroacoustic diagnostics of machine equipment*. Omsk: NPC Dynamics, 2007. 286 p.

25. Bryakin IV, Bochkarev IV, Khramshin VR. *Acoustic Emission Probe for Power Line Structure Diagnostic Systems*. 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2022, pp. 108-113.
26. Boganik GN, Gurvich II. *Seismic exploration*. Tver: AIS Publishing House, 2006. 744 p.
27. Collette C, Carmona-Fernandez P, Janssens S, et al. *Review of sensors for low frequency seismic vibration*. ATS/Note/2011/001 (TECH) 2011. p. 1-21.
28. Bryakin IV. Universal seismic recorder. *Problems of automation and control*. Bishkek: Ilim, 2009;1:111-120.
29. Robein Etienne. *Seismic Imaging: A Review of the Techniques, their Principles, Merits and Limitations*. EAGE Publications, Netherlands, 2010. 244 p.

Authors of the publication

Ivan V. Bryakin – Institute of Mechanical Science and Automation of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan.

Igor V. Bochkarev – Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, Bishkek, Kyrgyzstan.

Шифр научной специальности:

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений)

Получено

02.03.2023г.

Отредактировано

23.03.2023г.

Принято

24.03.2023г.

ОСОБЕННОСТИ ГАЗО-ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ ФЕНОЛОВ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Танеева А.В., Дмитриева А.В., Новиков В.Ф.

Казанский государственный энергетический университет

г. Казань, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8276-5311>, alinataneeva@mail.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Фенолы являются одним из основных загрязнителей водной сред и оказывают негативное влияние на организм человека. Поэтому их определение на сегодняшний день является актуальной проблемой. **ЦЕЛЬ.** Целью данной работы является определение содержания фенолов в водной среде газохроматографическим методом с использованием различных сорбционных материалов. Для этого необходимо рассмотреть некоторые особенности газохроматографического метода контроля содержания фенолов в водной среде с использованием различных сорбционных материалов. На основе детального литературного обзора показать, что фенолы и их производные относятся к высокотоксичным веществам, обладают низкими значениями норм ПДК, оказывают негативное влияние на организм человека, что обуславливает необходимость их контроля в водной среде. **МЕТОДЫ.** Для определения фенолов в водной среде экспериментальную часть работы проводили на газо-жидкостном хроматографе Кристаллюкс-4000М с пламенно-ионизационным детектором и насадочными колонками, заполненными различными сорбентами, в качестве которых применяли полиэтиленгликоль-1500, SE-30 и арсенированный полиэтиленгликоль ПЭГ(As). **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Для газохроматографического разделения фенолов и их производных использованы различные по физико-химической природе сорбционные материалы. Установлено, что наиболее оптимальным сорбентом, на котором разделяются практически все фенолы и их производные, является полиоксиэтилен бис арсенат, молекула которого содержит две арсенильные группы, способные вступать в межмолекулярные взаимодействия с анализируемыми сорбатами. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Проведено экспериментальное исследование содержания фенолов в водной среде с использованием газо-жидкостного хроматографа Кристаллюкс-4000М. Определены характеристики удерживания фенолов на различных по физико-химической природе сорбционных материалах. Показано, что наиболее полное разделение индивидуальных компонентов производных фенола осуществляется на сорбенте, приготовленном на основе полиоксиэтилен бис арсената, что объясняется наличием в структуре его молекулы неподелённых электронных пар атомов кислорода, способных вступать в межмолекулярные взаимодействия с гидроксильной группой фенолов. Установлена линейная зависимость логарифма относительного удерживаемого объёма фенолов от их дипольных моментов и показателя преломления. Отклонение от указанной зависимости наблюдается для фенолов, имеющих функциональные заместители в орто-положении бензольного кольца. Это объясняется электронным эффектом, приводящим к стерическим затруднениям при межмолекулярном взаимодействии в системе сорбент – сорбат. На основе проведенных теоретических исследований удалось полностью разделить индивидуальные компоненты фенолов, особенно имеющие близкие температуры кипения, что было апробировано на практике при контроле содержания фенолов в иловых отложениях бассейна реки Волга. Указанную методику газохроматографического анализа возможно использовать в системе экологического мониторинга водных экосистем.

Ключевые слова: фенолы; сорбционные материалы; арсенированный полиэтиленгликоль; газовая хроматография; время удерживания; разделение

Для цитирования: Танеева А.В., Дмитриева А.В., Новиков В.Ф. Особенности газохроматографического метода контроля содержания фенолов в водной среде // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 153-164. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-153-164.

FEATURES OF THE GAS CHROMATOGRAPHIC METHOD FOR MONITORING THE CONTENT OF PHENOLS IN AN AQUEOUS MEDIUM

AV. Taneeva, AV. Dmitrieva, VF. Novikov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8276-5311>, alinataneeva@mail.ru

Abstract: *THE RELEVANCE. Phenols are one of the main pollutants of the aquatic environment and have a harmful effect on the human body. Therefore, their determination today is an urgent problem. THE PURPOSE. The purpose of this work is to determine the content of phenols in an aqueous medium by gas chromatographic method using various sorption materials. To do this, it is necessary to consider some features of the gas chromatographic method for monitoring the content of phenols in an aqueous medium using various sorption materials. Based on a detailed literature review to show that phenols and their derivatives are highly toxic substances, have low values of MPC standards, have a negative impact on the human body, which necessitates their control in the aquatic environment. METHODS. To determine phenols in an aqueous medium, the experimental part of the work was carried out on a Crystallux-4000M gas-liquid chromatograph with a flame ionization detector and nozzle columns filled with various sorbents, as which polyethylene glycol-1500, SE-30 and arsenated polyethylene glycol PEG(As) were used. RESULTS. For gas chromatographic separation of phenols and their derivatives, sorption materials of various physicochemical nature were used. It has been established that the most optimal sorbent, which separates almost all phenols and their derivatives, is polyoxyethylene bis arsenate, the molecule of which contains two arsenyl groups capable of intermolecular interactions with the analyzed sorbates. CONCLUSION. An experimental study of the phenol content in an aqueous medium using a gas-liquid chromatograph Crystallux-4000M was carried out. The characteristics of the retention of phenols on sorption materials of different physicochemical nature are determined. It is shown that the most complete separation of the individual components of phenol derivatives is carried out on a sorbent prepared on the basis of polyoxyethylene bis arsenate, which is explained by the presence in the structure of its molecule of non-white electron pairs of oxygen atoms capable of intermolecular interactions with the hydroxyl group of phenols. The linear dependence of the logarithm of the relative volume of phenols on their dipole moments and refractive index is established. A deviation from this dependence is observed for phenols having functional substituents in the ortho- position of the benzene ring. This can be explained by the electronic effect? which leads to steric difficulties during intermolecular interaction in the sorbent – sorbate system. Based on the theoretical studies carried out, it was possible to completely separate the individual components of phenols, especially those with close boiling points. The obtained data were tested in practice when monitoring the content of phenols in the silt drains of the Volga river. This technique of gas chromatographic analysis can be used in the system of ecological monitoring of aquatic ecosystems.*

Keywords: *phenols; sorption materials; arsenated polyethylene glycol; gas chromatography; retention time; separation*

For citation: Taneeva AV., Dmitrieva AV., Novikov VF. Features of the gas chromatographic method for monitoring the content of phenols in an aqueous medium. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(2): 153-164. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-153-164.

Введение

Хроматографические методы контроля органических примесей в различных матрицах широко применяются в энергетической отрасли промышленности, особенно в диагностике маслonaполненного электрооборудования. При этом диагностику силовых трансформаторов проводят на основании хроматографического определения содержания антиокислительной присадки [1], а также органических экстрагентов, используемых для извлечения продуктов деструкции из трансформаторного масла [2]. Часто хроматографические методы контроля применяют для определения примесей загрязняющих веществ в объектах природной среды, технологических потоках промышленных предприятий и во многих других областях. Наиболее широко распространенными загрязнителями окружающей природной среды являются фенолы и их производные, которые обладают высокой токсичностью для организма человека, входят в

перечень приоритетных загрязнителей окружающей среды и требуют постоянного аналитического контроля [3-5].

К фенолам относятся вещества, в структуре молекул которых гидроксильная группа связана с бензольным кольцом, и могут содержать также другие функциональные заместители. Фенолы попадают в окружающую природную среду от антропогенных источников, а также в результате протекания фотохимических процессов, которые реализуются при разложении природных растительных материалов и последующей их деструкцией [6]. При этом, попадая в организм человека, фенолы блокируют сульфгидридные группы жизненно-важных ферментов, следствием которого является нарушение окислительно-восстановительных процессов в клетках. Под воздействием ультразвука высокой частоты происходит окислительная деструкция фенолов, а при анаэробном разложении твёрдых бытовых отходов протекают процессы их биodeградации [7].

Фенолы широко распространены и обычно загрязняют сточные воды, которые, в свою очередь, попадают в водную окружающую среду. Они входят в список приоритетных загрязнителей и поэтому они должны контролироваться. Помимо этого, фенолы могут попадать в окружающую среду в результате биохимических процессов в результате деструкции и разложения природных растительных материалов.

Это приводит к тому, что за содержанием в природной среде токсичных фенолов необходимо проводить аналитический контроль, проблема которого заключается в определении их низких концентраций. Поэтому большое значение для определения фенолов играет процедура пробоподготовки, которая проводится различными способами. С этой целью наиболее часто используют концентрирование примесных соединений фенолов с помощью жидкофазной экстракции либо путем деструкции фенолов в их производные с использованием индофенольной реакции обработкой анализируемой воды бромидом йода [8-10].

Следует отметить, что при обеззараживании питьевой воды хлорорганическими соединениями фенолы могут превращаться в диоксины, которые относят к суперэкоотоксикантам. Предельно-допустимые концентрации фенолов в сточных водах составляют 0,1 – 0,3 мг/л, а для питьевой воды от 0,1 до 0,001 мг/л.

Таким образом, за содержанием фенола и его производных в водных объектах необходимо осуществлять аналитический контроль, проблема которого заключается в определении их малых концентраций, часто находящихся за пределами чувствительности используемых детекторов в газовой хроматографии [11].

Для концентрирования фенолов из водных растворов использовали также процедуру твёрдофазной экстракции. В этом случае применяли молекулярный полимер, который был получен методом трафаретной печати. Изучены изменения, влияющие на эффективность твёрдофазной экстракции. После промывания сорбента дихлорметаном связанные компоненты фенола десорбировали ацетонитрилом с аммиаком [11].

При этом большое значение отводится оптимизации условий сорбционного концентрирования фенолов из водных растворов. В частности в работе [12] рассмотрены вопросы сорбционного концентрирования фенолов из водных растворов активных углей, которые относятся к неполярным гидрофобным адсорбентам с высокой удельной поверхностью, достигающей величины 2000 м²/г и хорошо развитой микропористостью [13]. Активный уголь БАУ-А, который обладает низкой каталитической активностью, смешивали с пористым политетрафторэтиленом, который характеризуется хорошей инертностью и высокой адгезионной способностью по отношению к углеродным материалам.

Установлено, что характеристики удерживания фенолов возрастают прямо пропорционально в случае повышения содержания активного угля. В этом случае при повышении содержания активного угля уменьшается проницаемость сорбционного слоя. Это приводит к сокращению расхода водной пробы при одинаковом давлении на входе в сорбционную колонку. Найдено оптимальное соотношение активированного угля, которое составляет 15 % от массы политетрафторэтилена.

Из экстракта хмеля фенол выделяли с использованием поливинилполипирролидона, который в дальнейшем анализировали методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с диодно-матричным детектированием и tandemной масс-спектрометрии с ионизацией электрораспылением [14]. Обнаружено, что эффективность выделения фенольных соединений зависит от их структуры и степень извлечения из образцов хмеля составляла более 70%. Более продвинутая система пробоподготовки была основана на твёрдофазной микроэкстракции фенолов с помощью мембранной технологии [15].

В этом случае полярные сорбенты были изолированы от пробы с использованием гидрофобной мембраны для твердофазной микроэкстракции, которая изготовлена на основе полиэтиленгликоля и полидиметилсилоксана. Эта система оказалась более эффективной по сравнению с использованием мембраны на основе полиакриловых волокон. Экстракцию фенолов из водных растворов проводили с использованием новых сорбционных материалов, которые были получены на основе угольных нанотрубок и полимерных композиций [16]. Для анализа полученных экстрактов наиболее часто используют хроматографический анализ. При этом начинает развиваться такое направление в контроле фенолов и их производных как мицелярно-экстракционное концентрирование и их цветометрическое определение с помощью смартфонов [17].

Твёрдофазное извлечение фенолов из экстрактов лекарственного сырья с использованием различных типов сорбционных материалов было описано в работе [18]. В качестве сорбционных материалов авторы применяли октадецилсиликагель, сополимер стирола и дивинилбензола химически модифицированный N-винилпирролидоном, сополимер дивинилбензола и N-винилпирролидона. Установлено, что для извлечения фенолов из лекарственных растений наиболее эффективны сорбенты, полученные на основе октадецилсиликагеля.

Перспективным направлением извлечения фенолов из водных сред является применение магнитных жидкостей, которые являются коллоидными растворами высокодисперсных магнитных частиц с размерами от 5 до 50 нм. Эти магнитные жидкости характеризуются сочетанием хорошей текучести и возможностью взаимодействовать с магнитным полем [19-20]. Свойства магнитных жидкостей зависят от сочетания входящих в них компонентов, к которым относится твердая магнитная фаза, дисперсная среда и стабилизатор, изменяя концентрации которых можно регулировать их характеристики. Для получения магнитных жидкостей их стабилизируют в жидкой среде, которая обычно является неполярной. При этом под влиянием магнитного поля наблюдается существенное увеличение вязкости. В сильном магнитном поле возможно затвердевание магнитной жидкости.

Таким образом, при контроле фенолов в водной среде применяют различные способы пробоподготовки, основным из которых является жидкофазная или твердофазная экстракция. Количественное содержание фенолов в экстрактах проводят в основном газохроматографическими методами с использованием самых разнообразных сорбционных материалов.

Целью данной работы является определение содержания фенолов в водной среде газохроматографическим методом с использованием различных сорбционных материалов. Научная новизна работы заключается в установлении линейной зависимости логарифма времени удерживания. Проведена оценка влияния структуры заместителей в фенольном кольце на их характеристики удерживания. На основе детального литературного обзора показано, что фенолы и их производные относятся к высокотоксичным веществам с различными значениями классов опасности, обладают низкими значениями норм ПДК, оказывают негативное влияние на организм человека, что обуславливает необходимость их контроля в водной среде.

Научная новизна работы заключается в установлении линейной зависимости логарифма времени удерживания фенолов от их дипольных моментов. При этом показано, что отклонение от указанной зависимости характерно для заместителей в фенольном кольце, находящихся в орто-положении. При этом орто-производные фенолов характеризуются более низкими значениями времени удерживания, чем соединения, имеющие функциональные заместители в пара- и мета-положении. Найденный эффект орто-заместителей может быть использован в практике газохроматографического разделения фенолов в сточных и поверхностных водах, а также в иловых отложениях при разработке и совершенствовании системы экологического мониторинга поверхностных вод рек и водоемов.

Материалы и методы

Экспериментальную часть работы проводили с использованием газового хроматографа «Кристаллюкс-4000М» с насадочными колонками, заполненными различными сорбентами, в качестве которых выступали арсенированные производные. Для приготовления сорбентов на инертный твердый носитель марки Хроматон-N-AW с размером зерен 0,16 — 0,20 мм наносили неподвижные жидкие фазы. С этой целью точную навеску неподвижной жидкой фазы растворяли в изопропанол, смешивали с инертным твердым носителем и нагревали до улетучивания растворителя. Подготовленный таким образом сорбент загружали в хроматографическую колонку и проводили её

кондиционирование в течение 5-6 часов при температуре 100 - 120 °С. В качестве объектов экспериментального исследования использовали фенолы и их производные, а также сточные воды промышленных производств.

Извлечение фенолов из сточных вод проводили с использованием процедуры бромирования. С этой целью 250 мл сточной воды подкисляли концентрированной серной кислотой. После этого в полученный раствор дозировали несколько капель бромной воды до изменения цвета на желтый. Полученный раствор подвергали центрифугированию. Добавляли 1-2 капли насыщенного раствора сульфата натрия и 20 мл н-гексана до обесцвечивания. При этом происходило разделение органической фазы, которую сушили с помощью сульфата натрия обезвоженного. Экстракт упаривали на водяной бане и вводили в инжектор хроматографической аппаратуры. После разделения на насадочной колонке определяли времена удерживания разделяемых компонентов.

Условия газо-хроматографического анализа:

- насадочная колонка длиной 3,5 м;
- внутренний диаметр колонки – 3 мм;
- детектор – пламенно-ионизационный;
- расход газа-носителя азота – от 20 ... 50 мл/мин;
- температура колонки 40 – 180 °С;
- температура инжектора – 200 °С;
- температура детектора – 220 °С.

Расход водорода для питания пламенно-ионизационного детектора – от 25 до 30 мл/мин, воздуха – 300-400 мл/мин.

Колонка заполнена арсенированными сорбентами.

Определяли времена удерживания индивидуальных компонентов анализируемых фенолов. На их основе рассчитывали относительные удерживаемые объёмы [15]:

$$V_{\text{отн}} = \frac{t_x - t_0}{t_{\text{см}} - t_0} \quad (1)$$

где: $V_{\text{отн}}$ – относительный удерживаемый объём фенолов,

t_x – время удерживания фенола,

$t_{\text{см}}$ – время удерживания вещества стандарта (н-гексан),

t_0 – время удерживания несорбирующегося в колонке компонента (метан).

Определяли логарифмические значения индексов удерживания Ковача [20]:

$$J = 100 \left[\frac{\lg t_x - \lg t_n}{\lg t_{n+1} - \lg t_n} \right] + 100n \quad (2)$$

где: J – логарифмический индекс удерживания Ковача,

t_x – приведенное время удерживания анализируемого фенола,

t_n – приведенное время удерживания н-алкана с числом атомов углерода в молекуле n ,

t_{n+1} – приведенное время удерживания н-алкана с числом атомов углерода в молекуле $n+1$.

На основе логарифмических индексов удерживания Ковача были рассчитаны факторы полярности Роршайдера:

$$J = Jn + ax + by + cz + du + es \quad (3)$$

где: J – логарифмический индекс удерживания стандартных сорбатов на исследуемом сорбенте,

Jn – логарифмический индекс удерживания стандартных сорбатов на неполярном сорбенте (сквалан на инертном твердом носителе),

a, b, c, d, e – факторы полярности стандартного сорбата,

x, y, z, u, s – факторы полярности исследуемого сорбента.

В качестве стандартных сорбатов применяли органические вещества, проявляющие электронодонорные или электроноакцепторные свойства, а также характеризующие ориентацию молекул при растворении анализируемых веществ в тонкой пленке неподвижной фазы, нанесенной на поверхность инертного твердого носителя. К ним относятся: бензол – донор π -электронов (x), этанол – способность к образованию

межмолекулярной водородной связи (v), метилэтилкетон – характеризует диполь-дипольное взаимодействие (z), нитрометан – акцептор электронов (u), пиридин – донор p -электронов (s). При получении сорбента на основе арсенированного полиэтиленгликоля была определена эффективность хроматографического разделения фенолов процента пропитки твердого носителя Хроматон N неподвижной жидкой фазой (Рис.1).

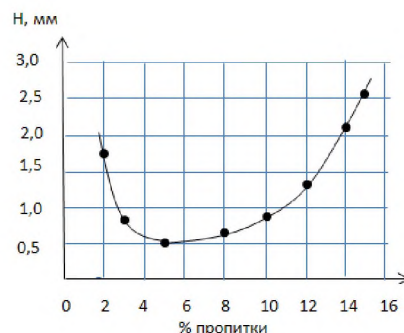


Рис.1. Зависимость высоты эквивалентной теоретической тарелки фенола от процента пропитки твердого носителя неподвижной жидкой фазы, арсенированного полиэтиленгликолем. Условия анализа: длина хроматографической колонки 1,5 м, внутренний диаметр 3 мм, скорость газа-носителя 25 мл/мин, температура анализа 170 °С, твердый носитель Хроматон N.

Fig.1. Dependence of the height of the equivalent theoretical plate of phenol on the percentage of impregnation of the solid carrier of the stationary liquid phase arsenic with polyethylene glycol. Analysis conditions: chromatographic column length 1.5 m, inner diameter 3 mm, carrier gas velocity 25 ml/min, analysis temperature 170 °C, Chromaton N solid support.

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Результаты и обсуждение

Физико-химические свойства фенолов и их производных представлены в таблице 1. Как видно из таблицы, фенолы по структуре своих молекул имеют пара-, мета-, орто-изомеры, которые характеризуются близкими значениями температур их кипения, что в условиях газо-жидкостной хроматографии затрудняет их селективное разделение на известных и широко распространенных сорбентах. Поэтому необходимо использовать сорбенты, обладающие специфической селективностью разделения позиционных изомеров.

Ранее для этой цели нами были использованы сорбенты, полученные на основе арсенированных производных, которые проявляют специфическую селективность при разделении гидроксилсодержащих соединений [15].

Таблица 1

Физико-химические свойства фенолов и их производных ($T_{\text{кип}}$, °С – температура кипения; $T_{\text{пл}}$, °С – температура плавления; μ_{20} – дипольный момент, n_d^{20} – показатель преломления, ПДК – предельно-допустимая концентрация)

Table 1

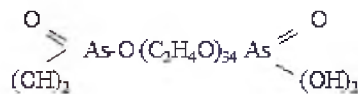
Physical and chemical properties of phenols and their derivatives ($T_{b,p}$, °C - boiling point; $T_{m,p}$, °C - melting point; μ_{20} - dipole moment, n_d^{20} - refractive index, MAC - maximum allowable concentration)

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

№ пп	Фенолы	$T_{\text{кип}}$, °С	$T_{\text{пл}}$, °С	μ_{20}	n_d^{20}	ПДК, мг/л	Класс опасности
1	орто-Хлорфенол	175	7	1,31	1,5473	0,0001*	1
2	Фенол	182	41	1,46	1,5425	0,001	2
3	орто-Крезол	191	31	1,41	1,5453	0,003	2
4	пара-Крезол	202	36	1,57	1,5359	0,004	2
5	мета-Крезол	202	11	1,54	1,5438	0,004	2
6	мета-Хлорфенол	214	33	2,10	1,5568	0,001	4
7	пара-Хлорфенол	217	43	2,22	1,5579	0,001	4

* - ПДК в воде водных объектов рыбохозяйственного назначения

В продолжении ранее проведенных исследований представляло определенный интерес оценить исследуемые сорбенты для разделения фенолов и их производных. С этой целью в качестве сорбента использовали Полиоксиэтилен бис арсенат структурной формулы



который был получен путем арсенирования полиэтиленгликоля с молекулярной массой 1500 и нанесен на инертный твердый носитель Хроматон –N в количестве 5% от массы. В таблице 2 приведены относительные удерживаемые объемы фенолов и их производных на различных сорбентах.

Таблица 2

Относительные удерживаемые объемы фенолов на различных сорбентах

Table 2

Relative retention volumes of phenols on various sorbents

**Источник: составлено автором. Source: compiled by the author*

№ пп	Фенолы	T _{конт.} , °C	Относительный удерживаемый объем (V _{отн.})		
			T _{конт.} =180 °C		
			5% ПЭГ (As)	5% ПЭГ-1500	5% SE-30
1	орто-Хлорфенол	175	21,94	14,12	1,96
2	фенол	182	47,44	21,04	2,28
3	орто-Крезол	191	42,00	22,32	2,66
4	пара-Крезол	202	67,67	27,24	2,84
5	мета-Крезол	202	63,65	31,80	2,84
6	мета-Хлорфенол	214	181,68	98,78	4,98
7	пара-Хлорфенол	217	193,62	98,80	5,24

Как видно из таблицы, на неполярном сорбенте (5% SE-30) практически не разделяются пара- и мета-крезолы, так как относительные удерживаемые объемы этих компонентов имеют одинаковые значения. На более полярном сорбенте не разделяются пара- и мета-хлорфенол, а селективность разделения пара- и мета-крезола небольшая. На арсенированном полиэтиленгликоле наблюдается достаточно четкое разделение всех компонентов производных фенола, что, очевидно, связано с разной способностью к образованию водородной связи в системе сорбат-сорбент.

Известно, что полярность сорбента может быть охарактеризована дипольным моментом сорбата, так как в молекулярных системах распределение отрицательных зарядов является функцией плотности вероятности распределения электронов. При этом определение дипольных моментов основано на нахождении ориентационного эффекта полярных молекул в случае приложения электрического поля.

На рис. 2 приведена зависимость времени удерживания фенолов на арсенированном сорбенте от их дипольных моментов. Как видно из рис., эта зависимость является линейной. Отклонение от указанной зависимости наблюдается для фенолов, имеющих функциональные заместители в орто-положении фенольного кольца. При этом для орто-хлорфенола наблюдается более существенное отклонение от указанной зависимости, чем орто-крезола. Это свидетельствует о том, что влияние, которое оказывают функциональные заместители на время удерживания фенолов, является переменной величиной, т.е. не является однородной константой. Оно, очевидно, может передаваться по различным механизмам и зависит от физико-химических свойств функциональных заместителей.

Во всех случаях орто-производные фенолов характеризуются более низкими значениями времени удерживания, чем соединения, имеющие функциональные заместители в пара- и мета-положении.

Аналогичная зависимость наблюдается для показателей преломления фенолов, которые так же, как и дипольные моменты могут характеризовать полярные свойства сорбционных материалов (Рис.3).

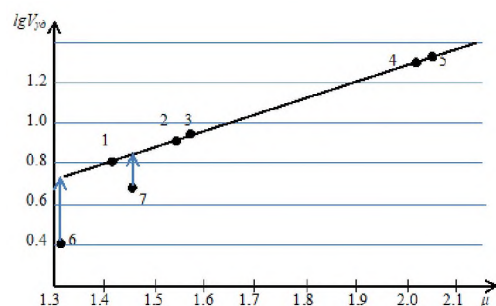


Рис. 2. Зависимость логарифма времени удерживания фенолов от их дипольных моментов для арсенированного сорбента. 1 – фенол; 2 – м-Крезол; 3 – п-Крезол; 4 – м-Хлорфенол; 5 – п-Хлорфенол; 6 – о-Хлорфенол; 7 – о-Крезол.

Fig. 2. Dependence of the logarithm of the retention time of phenols on their dipole moments for the arsenic sorbent. 1 - phenol; 2 - m-Cresol; 3 - p-Cresol; 4 - m-Chlorophenol; 5 - p-Chlorophenol; 6 - o-Chlorophenol; 7 - o-Cresol.

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

В общем случае эта зависимость выражается в определенных изменениях логарифма относительного удерживаемого объема фенолов в соответствии с изменением их показателя преломления. При этом с ростом показателей преломления фенолов наблюдается повышение их логарифма относительного удерживаемого объема. Тангенс угла наклона соответствующей прямой значительно выше для показателей преломления по сравнению с дипольными моментами. Кроме того, также более высокой является величина отклонения от приведенной зависимости для заместителей в фенольном кольце, находящихся в орто-положении. Это отклонение для орто-Хлорфенола в случае показателей преломления составляет $\Delta \lg V_{отн} = 0.28$, для дипольных моментов $\Delta \lg V_{отн} = 0.30$, то есть вклады в орто-эффект являются практически равнозначными. Аналогичная картина наблюдается и для орто-Крезола.

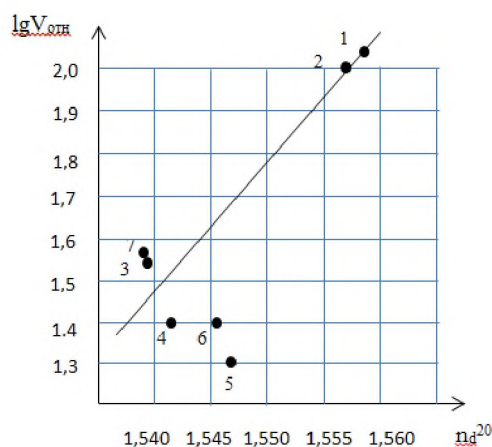


Рис.3. Зависимость логарифма относительного удерживаемого объема ($\lg V_{отн}$) фенолов от их показателя преломления (nd_{20}). 1 – п-Хлорфенол; 2 – м-Хлорфенол; 3 – м-Крезол; 4 – Фенол; 5 – о-Хлорфенол; 6 – о-Крезол; 7 – п-Крезол.

Fig.3. Dependence of the logarithm of the relative retained volume ($\lg V_{rel}$) of phenols on their refractive index (nd_{20}). 1 - p-Chlorophenol; 2 - m-Chlorophenol; 3 - m-Cresol; 4 - Phenol; 5 - o-Chlorophenol; 6 - o-Cresol; 7 - p-Cresol.

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

При этом во всех случаях наблюдается линейная зависимость логарифма относительного удерживаемого объема от обратного значения температуры хроматографической колонки. Для арсенированных полиэтиленгликолей тангенс угла наклона соответствующей прямой существенно выше (Рис. 4, кривые 1,2), чем для неполярного сорбента SE-30. Слабая зависимость сорбента, полученного на основе кремнийорганической неподвижной фазы (SE-30) приводит к плохому разделению фенола и хлорфенола, так как в этом сорбенте отсутствуют полярные функциональные группы, способные к различным типам межмолекулярных взаимодействий в системе сорбат – сорбент.

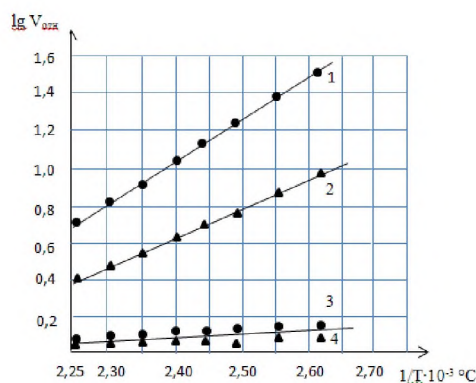


Рис.4. Зависимость логарифма относительного удерживаемого объема фенола и орто-Хлорфенола от обратного значения температур хроматографической колонки. Сорбент As (ПЭГ): 1. – Фенол, 2 – о-Хлорфенол. Сорбент SE-30: 3. – Фенол, 4 – о-Хлорфенол.

Fig.4. Dependence of the logarithm of the relative retention volume of phenol and ortho-Chlorophenol on the reciprocal of the temperatures of the chromatographic column. Sorbent As (PEG): 1. - Phenol, 2 - o-Chlorophenol. Sorbent SE-30: 3. - Phenol, 4 - o-Chlorophenol.

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

В качестве примера в таблице 3 приведены результаты анализа фенолов в иловых отложениях бассейна реки Волга. Извлечение фенолов из иловых отложений проводили с использованием водяного пара. Как видно из таблицы, практически по всем индивидуальным компонентам фенолов наблюдается существенное превышение норм ПДК.

Таблица 3

Определение фенолов в донных отложениях бассейна реки Волга методом газожидкостной хроматографии ($n=5$, $P=0,95$). R, % - степень извлечения фенолов; $\bar{C}$, мг/л - средняя концентрация фенола; Sr – относительное стандартное отклонение; ПрО – предел обнаружения фенолов; ПДК – предельно-допустимая концентрация.

Table 3

Determination of phenols in bottom sediments of the Volga River basin by gas-liquid chromatography ($n=5$, $P=0.95$). R, % - degree of extraction of phenols; $\bar{C}$, mg/l - average concentration of phenol; Sr is the relative standard deviation; PrO is the detection limit for phenols; MPC - maximum permissible concentration.

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

№ _{п/п}	μ_{20}	$T_{кпп}$, °C	Введено, $\bar{C}$, мг/л	Найдено $\bar{C} \pm \Delta C$, мг	R, %	Sr	ПрО, мг	ПДК, мг/л
1	орто-Хлорфенол	175	0,10	0,090±0,004	90,25	0,037	0,0015	0,0001*
2	Фенол	182	0,10	0,090±0,005	89,72	0,049	0,0013	0,001
3	орто-Крезол	191	0,10	0,089±0,004	88,66	0,040	0,0014	0,003
4	пара-Крезол	202	0,10	0,086±0,004	85,81	0,038	0,0022	0,004
5	мета-Крезол	202	0,10	0,081±0,003	80,64	0,029	0,0056	0,004
6	мета-Хлорфенол	214	0,10	0,080±0,004	79,85	0,036	0,0033	0,001
7	пара-Хлорфенол	217	0,10	0,086±0,005	86,42	0,045	0,0022	0,001

* - ПДК в воде водных объектов рыбохозяйственного назначения

Заключение

Проведено экспериментальное исследование содержания фенолов в водной среде с использованием газо-жидкостного хроматографа Кристаллюкс-4000М. Определены характеристики удерживания фенолов на различных по физико-химической природе сорбционных материалах. Показано, что наиболее полное разделение индивидуальных компонентов производных фенола осуществляется на сорбенте, пьриготовленном на основе полиоксизтилен бис арсената, что объясняется наличием в структуре его молекулы неподелённых электронных пар атомов кислорода, способных вступать в межмолекулярные взаимодействия с гидроксильной группой фенолов. Установлена линейная зависимость логарифма относительного удерживаемого объема фенолов от их дипольных моментов и показателя преломления. Отклонение от указанной зависимости наблюдается для фенолов.

имеющие функциональные заместители в орто-положении бензольного кольца. Это объясняется электронным эффектом, приводящим к стерическим затруднениям при межмолекулярном взаимодействии в системе сорбент – сорбат. На основе проведенных теоретических исследований удалось полностью разделить индивидуальные компоненты фенолов, особенно имеющие близкие температуры кипения, что было апробировано на практике при контроле содержания фенолов в иловых отложениях бассейна реки Волга. Указанную методику газо-хроматографического анализа возможно использовать в системе экологического мониторинга водных экосистем.

Литература

1. Нгуен Зуи Хынг, Новиков В.Ф. Влияние природы органических растворителей на процесс разделения антиокислительной присадки в трансформаторном масле газо-хроматографическими методами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т.22. №6. С.211-220.
2. Ву Нгок Зан, Новиков В.Ф. Хроматографические методы исследования органических экстрагентов трансформаторного масла // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т.22. №6. С.202-210.
3. Kabir A., Mocana A., Santoleri M., Simone M.D. et al. Analyses of Monophenols. In book: Recent advances in Natural Product Analysis. Edition 1, Chapter 2. Elsevier. 2020, pp.19-27. DOI:[10.1016/b978-0-12-816455-6.00002-0](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816455-6.00002-0)
4. Higashi Y. Simple HPLC-UV Analysis of Phenol and its related compounds in Tap Water after Pre-Column Derivatization with 4-nitrobenzoyl Chloride // G. of Analyt. Sci., Methods and Instrumentation. 2017. V.7. N.1. pp.2164-2753.
5. Gilart N., Marse R.M., Borrull F., Fontanals N. New Coatings for Stir-Bar Sorptive Extractions of Polar Emerging Organic Contaminants // Trends Anal. Chem. 2014 V. 54 P. 11-23.
6. Adam O.E.A., Al-Dujaili A.H. The removal of Phenol and its Derivatives from Aqueous solutions by Absorption on Petroleum Asphaltene // Journal of Chemistry. 2013. V. 2013. 8 P. <https://doi.org/10.1155/2013/694029>
7. Асеев Д.Г., Сизых М.Р., Батоева А.Н. Окислительная деструкция фенолов в комбинированных соно-фентон подобных системах при воздействии высокочастотного ультразвука // Журнал физической химии. 2017. Т.91. №12. С.2044-2049.
8. Ng N.T., Kamaruddin A.F., Wan Ibrahim W.A., Sanagi M.M., Abdul Keyon A.S. Advances in organic-inorganic hybrid sorbents for the extraction of organic and inorganic pollutants in different types of food and environmental samples // Journal of Separation Science. 2018. V.41. pp.195-208. DOI:[10.1002/jssc.201700689](https://doi.org/10.1002/jssc.201700689)
9. Cha D., Qiang N. Chromatography: Determining o-nitrophenol in wastewater // Filtration @ Separation. 2012. V. 49(2). pp. 38-41. DOI: 10.1016/S0015-1882(12)70113-1
10. Груздев И.В., Кондратенко Б.М., Зуева О.М., Лю-Лян-Мин Е.И. Особенности пробоподготовки при определении фенола в высокоцветных природных водах методом газовой хроматографии // Аналитика и контроль. 2019. Т.23. №2. С.229-236. DOI: 10.15826/analitika.2019.23.2.004
11. Танеева А.В., Дмитриева А.В., Новиков В.Ф., Ильин В.К. Газохроматографическое определение фенолов в поверхностных водах с использованием полиоксиэтилен бис арсената // Аналитика и контроль. 2020. Т.24. № 4. С. 305-314. DOI: 10.15826/analitika.2020.24.4.001
12. Peiper Q., Jincheng W., Jing J., Fan S., Jiping. C. 2,4-Dimethylphenol imprinted polymers as a solid-phase extraction sorbent for class-selective extraction of phenolic compounds from environmental water // Talanta. 2010. V.81. N5. Pp.1630-1635. doi: 10.1016/j.talanta.2010.03.015
13. Медведев Е.И., Родинков О.В. Оптимизация условий сорбционного концентрирования фенола из водных растворов на активном угле // Вестник СПбГУ. 2016. Сер.4. Т.3 (61). Вып.2. С.224-230
14. Щербакова К.Д., Яшин Я.И. Углеродные адсорбенты в хроматографии // 100 лет хроматографии. 2003. С.670-697
15. Magalhaes J.P., Vieira J.S., Goncalves L.M. et al. Isolation of phenolic compounds from hop extracts using polyvinylpyrrolidone: characterization by high-performance liquid chromatography-diode array detection – electrospray tandem mass spectrometry // G. Chromatography. 2010. V.1217. N.9. pp.3258-3268. DOI:[10.1016/j.chroma.2009.10.068](https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.10.068)
16. Танеева А.В., Дмитриева А.В., Новиков В.Ф., Ильин В.К. Газохроматографическое определение фенолов в поверхностных водах с использованием полиоксиэтилен бис арсената // Аналитика и контроль. 2020. Т.24. №4. С.305-314.

17. Груздев И.В., Кондратёнок Б.М., Лю-Лян Мин Е.И. Определение монозамещенных нитрофенолов в воде методом газовой хроматографии // Аналитика и контроль. 2020. Т.24. №2. С. 142-151.

18. Доронин С.Ю., Жестовская Е.С., Цыгулева З.И. Мицеллярно-экстракционное концентрирование и цветометрическое определение некоторых фенолов // Журнал аналитической химии. 2020. Т.75. №6. С. 502-509.

19. Шилко Е.А., Темердашев З.А., Милевская В.В., Киселева Н.В. Сорбционные характеристики сорбентов для твердофазной экстракции фенольных соединений из экстрактов лекарственных растений // Сорбционные и хроматографические процессы. 2019. N19(2). С.157-167. DOI: 10.1738 sorpehzon 2019.19/733

20. Sherer C., Figueiredo Neto A.M. Ferrofluids: Properties and Applications // Brazilian Journal of Physics. 2005. V.35. N.3A. P.718-727.

20. Макаров В.М., Калаева С.З., Шипилин А.М. и др. Переработка железосодержащих отходов с получением наночастиц для изготовления магнитной жидкости // Нанотехника. 2004. Т.4. №12. С.66-69

Авторы публикации

Танеева Алина Вячеславовна – канд. хим. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», Казанский государственный энергетический университет.

Дмитриева Александра Витальевна – аспирант кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», Казанский государственный энергетический университет.

Новиков Вячеслав Федорович – д-р хим. наук, профессор кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Nguen Zui Khyng, Novikov V.F. Influence of the nature of organic solvents on the process of separation of an antioxidant additive in transformer oil by gas chromatographic methods. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22 (6): 211-220.

2. Vu Ngok Zan, Novikov V.F. Chromatographic methods of investigation of organic extractants of transformer oil. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22 (6): 211-220. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22 (6): 202-210.

3. Kabir A., Mocana A., Santoleri M., Simone M.D. et al. *Analyses of Monophenols*. In book: *Recent advances in Natural Product Analysis*. Edition 1, Chapter 2. Elsevier, 2020, p.19-27. DOI: [10.1016/b978-0-12-816455-6.00002-0](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816455-6.00002-0)

4. Higashi Y. Simple HPLC-UV Analysis of Phenol and its related compounds in Tap Water after Pre-Column Derivatization with 4-nitrobenzoyl Chloride. *G. of Analyt. Sci., Methods and Instrumentation*. 2017; 7(1): 2164-2753.

5. Gilart N., Marse R.M., Borrull F., Fontanals N. New Coatings for Stir-Bar Sorptive Extractions of Polar Emerging Organic Contaminants. *Trends Anal. Chem.* 2014; 54: 11-23.

6. Adam O.E.A., Al-Dujaili A.H. The removal of Phenol and its Derivatives from Aqueous solutions by Absorption on Petroleum Asphaltene. *Journal of Chemistry*. 2013; 2013: 8 P. <https://doi.org/10.1155/2013/694029>

7. Aseev D.G., Sizykh M.R., Batoeva A.N. Oxidative degradation of phenols in combined sono-fenton-like systems under the influence of high frequency ultrasound. *Journal of physical chemistry*. 2017; 91(12): 2044-2049.

8. Ng N.T., Kamaruddin A.F., Wan Ibrahim W.A., Sanagi M.M., Abdul Keyon A.S. Advances in organic-inorganic hybrid sorbents for the extraction of organic and inorganic pollutants in different types of food and environmental samples. *Journal of Separation Science*. 2018; 41: 195-208. DOI: [10.1002/jssc.201700689](https://doi.org/10.1002/jssc.201700689)

9. Cha D., Qiang N. Chromatography: Determining o-nitrophenol in wastewater. *Filtration @ Separation*. 2012; 49(2): 38-41. DOI: 10.1016/S0015-1882(12)70113-1

10. Gruzdev I.V., Kondratenok B.M., Zueva O.M., Lyu Lyan Min E.I. Features of sample preparation for the determination of phenol in high-color natural water by gas chromatography. *Analytica and control*. 2019; 23(2): 229-236. DOI: 10.15826/analitika.2019.23.2.004

11. Taneeva A.V., Dmitrieva A.V., Novikov V.F., Ilyin V.K. Gas chromatographic determination of phenols in surface waters using polyoxyethylene bis arsenate // *Analytica and control*. 2020. 24(4):. 305-314. DOI: 10.15826/analitika.2020.24.4.001
12. Peiper Q., Jincheng W., Jing J., Fan S., Jiping. C. 2,4-Dimethylphenol imprinted polymers as a solid-phase extraction sorbent for class-selective extraction of phenolic compounds from environmental water. *Talanta*. 2010; .81(5): 1630-1635. DOI:10.1016/j.talanta.2010.03.015
13. Medvedev E.I., Rodinkov O.V. Optimization of conditions for sorption concentration of phenol from aqueous solutions on activated carbon. *Bulletin of St. Peterburg state university*. 2016; .3 (61). 224-230
14. Shcherbakova K.D., Yashin Ya.I. Carbon adsorbents in chromatography. *100 years of chromatography*. 2003; 670-697
15. Magalhaes J.P., Vieira J.S., Goncalves L.M. et al. Isolation of phenolic compounds from hop extracts using polyvinylpyrrolidone: characterization by high-performance liquid chromatography-diode array detection – electrospray tandem mass spectrometry. *J. Chromatography*. 2010; 1217(9): .3258-3268. DOI:[10.1016/j.chroma.2009.10.068](https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.10.068)
16. Taneeva A.V., Dmitrieva A.V., Novikov V.F., Il'in V.K. Танеева Gas chromatographic determination of phenols in surface waters using polyoxyethylene bis arsenate. *Analytica and control*. 2020; 24(4). 305-314.
17. Gruzdev I.V., Kondratenok B.M., Lyu Lyan Min E.I. Determination of monosubstituted nitrophenols in water by gas chromatography. *Analytica and control*. 2020; 24(2). 142-151.
18. Doronin S.U., Zhestovskaya E.S., Tsyguleva Z.I. Micellar extraction concentration and colorimetric determination of some phenols. *Journal of analytical chemistry*. 2020; 75(6): 502-509.
19. Shilko E.A., Temerdashev Z.A., Milevskaya V.V., Kiseleva N.V. Sorption characteristics of sorbents for solid-phase extraction of phenolic compounds from extracts of medicinal plants. *Sorption and chromatographic processes*. 2019; 19(2). 157-167. DOI: 10.17381/sorpelzon.2019.19/733
20. Sherer C., Figueiredo Neto A.M. Ferrofluids: Properties and Applications. *Brazilian Journal of Physics*. 2005. 35(.3A). 718-727.
20. Makarov V.M., Kalaeva S.Z., Shipilin .M. et al. Processing of iron-containing waste to produce nanoparticles for the manufacture of magnetic fluid. *Nanotechnology*. 2004. 4 (12). 66-69.

Authors of the publications

Alina V. Taneeva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Alexandra V. Dmitrieva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vyacheslav F. Novikov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности:

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Получено

02.02.2023г.

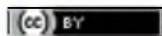
Отредактировано

16.02.2023г.

Принято

17.02.2023г.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



МРНТИ 44.01.05 86.29

УДК 628.5 (075.8)

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-2-165-175

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОНЛАЙН МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ УСЛОВИЙ ТРУДА В АО «АЛАТАУ ЖАРЫҚ КОМПАНИЯСЫ»

Абикенова А.А., Жандаулетова Ф.Р., Санатова Т.С., Остемир Г.С.
НАО Алматинский университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева,
г. Алматы, Казахстан

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-8378-6843>

a.abikenova@aes.kz, f.zhandauletova@aes.kz, t.sanatova@aes.kz, g.ostemir@aes.kz

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ работы заключается в установлении взаимосвязи производственного травматизма, при онлайн мониторинге в электросетевой компании, с воздействием опасных производственных факторов, так как последняя является причиной аварий, несчастных случаев и других профессиональных рисков работников и утраты здоровья работников. Для этого необходимо разработать методы причин, характера и применение систем предупреждения и локализации несчастных случаев, аварий. ЦЕЛЬ. В статье рассмотрены возможные решения актуальной проблемы – анализ и определение причин производственного травматизма и профессиональной заболеваемости в электроэнергетике и оценка профессиональных рисков работников и утраты здоровья работников на опасных производственных объектах, а также о недостаточном внимании работодателей к реконструкции и модернизации производства, разработке и применению систем предупреждения и локализации несчастных случаев, аварий, профилактической работе, контролю за состоянием производственной среды и соблюдению санитарно-гигиенических требований, что приведет в целом к техногенной безопасности. МЕТОДЫ. Основным методом исследования было принято разработка и применение систем предупреждения и локализации несчастных случаев, аварий, профилактической работы, контроля за состоянием производственной среды и соблюдения санитарно-гигиенических требований. РЕЗУЛЬТАТЫ. Рассмотрены методы онлайн мониторинга параметров условий труда, при этом авторами проведены специальные исследования комплексного влияния неблагоприятных факторов окружающей природной среды и условий труда, позволяющие однозначно выделить приоритетные этиологические факторы, а также источники воздействия на среду обитания людей. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Обращено внимание на перспективность в условиях интенсивного техногенного загрязнения окружающей среды неблагоприятного воздействия производственных факторов. Авторы полагают, что для повышения результативности социально-гигиенического мониторинга в анализе и прогнозировании влияния среды обитания на здоровье населения необходима разработка объективных критериев оценки как окружающей природной, так и производственной среды с целью изучения существенных сдвигов и разработки мероприятий по повышению и улучшению условий труда и средств управления безопасностью производства, адаптационных возможностей организма и предупреждению экологической патологии.

Ключевые слова: условия труда; мониторинг производственной среды; производственный травматизм; профессиональная заболеваемость; критерии оценки; электротравма; вредный производственный фактор.

Для цитирования: Абикенова А.А., Жандаулетова Ф.Р., Санатова Т.С., Остемир Г.С. Исследование методов онлайн мониторинга параметров условий труда в АО «Алатау жарық компаниясы» // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 165-175. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-165-175.

STUDY OF METHODS OF ON-LINE MONITORING OF PARAMETERS OF WORKING CONDITIONS IN JSC «ALATAU ZHARYK COMPANY»

AA. Abikenova, FR. Zhandauletova, TS. Sanatova, GS. Ostemir
Almaty University of Power Engineering and Telecommunications
named after Gumarbek Daukeev

e-mail: a.abikenova@aes.kz, f.zhandauletova@aes.kz, t.sanatova@aes.kz,
g.ostemir@aes.kz

Abstract: *RELEVANCE* of the work lies in establishing the relationship between industrial injuries, when online monitoring in the electric grid company, with the influence of hazardous production factors, since the latter is the cause of accidents, Accidents and other occupational hazards of employees and loss of health of employees. For this purpose it is necessary to develop methods of causes, nature and application of systems of prevention and localization of accidents, accidents. *THE PURPOSE.* The article discusses possible solutions to an urgent problem - analysis and determination of the causes of industrial injuries and occupational morbidity in the electric power industry and assessment of occupational risks of workers and loss of health of workers at hazardous production facilities, as well as the lack of attention of employers to the reconstruction and modernization of production, the development and application of warning systems and localization of accidents, accidents, preventive work, control over the state of the production environment and compliance with sanitary and hygienic requirements, which will generally lead to industrial safety. *METHODS.* The main research method was the development and application of systems for the prevention and localization of accidents, accidents, preventive work, monitoring the state of the production environment and compliance with sanitary and hygienic requirements. *RESULTS.* The methods of online monitoring of the parameters of working conditions are considered, while the authors carried out special studies of the complex influence of adverse environmental factors and working conditions, which make it possible to unambiguously identify priority etiological factors, as well as sources of impact on the human environment. *CONCLUSION.* Attention is drawn to the prospects of the adverse impact of production factors under conditions of intensive technogenic pollution of the environment. The authors believe that in order to increase the effectiveness of socio-hygienic monitoring in the analysis and forecasting of the impact of the environment on the health of the population, it is necessary to develop objective criteria for assessing both the natural and industrial environment in order to study significant changes and develop measures to improve and improve working conditions and means management of production safety, adaptive capabilities of the body and the prevention of environmental pathology.

Keywords: working conditions; monitoring of the working environment; occupational injuries; occupational morbidity; assessment criteria; electrical injury; harmful production factor.

For citation: Abikenova A.A, Zhandauletova F.R, Sanatova TS, Ostemir GS. Study of methods of on-line monitoring of parameters of working conditions in JSC «ALATAU ZHARYK COMPANY». *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(2):165-175. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-165-175.

Введение (Introduction)

Актуальность проблемы. Анализ состояния производственного травматизма и профессиональной заболеваемости в электроэнергетике показал, что существует проблема недостаточного внимания работодателей к модернизации производства, применению систем предупреждения несчастных случаев, сокращении управленческих структур, требующей изменения методов оценки работоспособности трудовых ресурсов.

В настоящее время прямой контроль за деятельностью промышленных предприятий, осуществляет государство, такие права отмечены как в Трудовом Кодексе Республики Казахстан, так и во втором документе - законе РК «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения». То есть государственная политика заключается в выявлении неблагоприятных ситуаций и факторов нарушений производственных процессов; здоровый микроклимат и состояния здоровья рабочих; внедрении профилактических мероприятий для безопасного труда на предприятиях; в целом контроле и оценки условий труда.

проведение аттестации рабочих мест с получением сертификации на соответствие требованиям данного предприятия.

Особенностью решения данного вопроса для предприятий, в том числе энергетики, это проведение мониторинга всех параметров условий труда работающих, что тоже можно найти в документах Правительства РК:

- 1) «Положение о проведении социально-гигиенического мониторинга»;
- 2) «Концепции демографической политики РК на период до 2025 года»;
- 3) «О надзоре в сфере защиты прав человека»;
- 4) «Об аттестации рабочих мест по условиям труда» и другие.

Решение вопросов безопасности на энергетических предприятиях является приоритетным направлением и сводится к исключению, либо в сведении к минимуму случаев производственного травматизма. Проведенный анализ причин, показывает, что проводятся исследования, где приводятся организационные и технические решения, которые улучшили бы защиту персонала, которые обеспечивают работу энергетического оборудования. Согласно статистическим данным, очень часто аварии на данных предприятиях приводят к большому количеству пострадавших среди работающего персонала, причем к травмам от действия электрического тока меньше, однако по количеству электротравм и случаев летальности занимает одни из ведущих мест. В качестве примера можно отметить, что «на энергетических предприятиях несчастные случаи по причине поражения персонала электрической дугой составляют 70 %» [1-5]. При анализе и выявлении причин по производственному травматизму, которые случались с работниками с поражением электрического тока, выявлено почти в большинстве несчастных случаев - это незнание правил по безопасности обслуживания и ремонта электрооборудования, что приводит «к снижению сопротивления изоляции, появлению напряжения на нетоковедущих его частях» [6-9].

Целью проведенных исследований являлась разработка рекомендаций по проведению методов мониторинга охраны труда, рисков и потери здоровья работников на таких энергетических производственных объектах как АО «Алатау Жарык Компаниясы».

Авторами были решены такие вопросы: изучены нормативно-правовая документация, заключающие соблюдение условий безопасности на объекте, укрепление условий труда; систематизированы теории по вопросам оценки и возникновения травматизма, профессиональных заболеваний из-за имеющих место различных производственных факторов; а также рассмотрены вопросы системы управления рисками ухудшения здоровья работников; выявлены из многообразия существующих методик для данной отрасли с целью улучшения условий на рабочих местах.

При решении как теоретических, так и методологических вопросов, исследования основывались на многих трудах как отечественных, так и зарубежных разработок и статей в материалах научно-технических конференций авторов, посвященных БИОТ, оценки риска при получении работником производственных травм и заболеваний, а также снижению таких рисков при улучшении условий труда для работающего персонала.

Одной из крупнейшей электросетевой компанией, занимающей одно из ведущих мест в южном регионе ЕЭС Республики Казахстан, осуществляющая надежную работу электрических сетей и ее дальнейшее развитие, а также по обеспечению больших увеличивающихся нагрузок г. Алматы и Алматинской области, это предприятие АО «Алатау Жарык Компаниясы».

В настоящее время АО «АЖК» снабжает электрической энергией людей Алматинской области, где проживает порядка 4 миллионов жителей, работа которой направлена на энергетическую стабильность в данном регионе и бесперебойное обеспечение потребителей электроэнергией, где единственным акционером АО «АЖК» является АО «Самрук-Энерго».

Компания обслуживает различные линии электропередач: воздушные, кабельные и распределительные различной протяженностью и напряжения: 220–110-35-10-6-0,4 кВ соответственно, а также трансформаторные подстанции напряжением 35 кВ и выше, суммарной мощностью 9 808 МВА.

Литературный обзор. (Literature Review)

Одним из главных показателей развития в настоящее время является энергетическая промышленность, так как потребление энергии свойственно всем промпредприятиям, сельскохозяйственному производству, а также в хозяйственной деятельности населения: отопление домов, при приготовлении пищи, приема душа и другие. А использование всех видов энергии в мире привело к высокому росту уровня

жизни и в настоящее время люди очень зависимы от энергии. Основные источники энергии, которые доступны человеку на сегодня являются ископаемое топливо, ядерная и термоядерная энергия и возобновляемые энергетические ресурсы.

Производство энергии существенно влияет на состояние окружающей среды. Большинство промышленных предприятий при сжигании ископаемого твердого и жидкого топлива, которое сопровождается выделением сернистого, углекислого и угарного газов, а также оксидов азота, пыли, сажи и других загрязняющих веществ, отрицательно воздействуют на окружающую среду, работающих и других живых организмов. Поэтому из-за обострения глобальных экологических проблем: кислотные осадки и изменение климата, на промпредприятиях проводится производственный контроль для сохранения безопасности и ущерба здоровью людей, последствий воздействия этих процессов на окружающую среду

Учитывая данную ситуацию в нынешних условиях, рациональным и единственным решением можно назвать энергосбережения, которое и является приоритетным в стратегии развития любой страны, так как запасы традиционных источников энергии являются не бесконечными и ограничены [2-3].

По статистике Международной организации труда (МОТ), около 2,5 миллионов человек каждый год погибают из-за несчастных случаев и болезней, приобретённых на производстве, т.е. ежедневно в среднем 6000 человек страдает от производственного травматизма. Во всем мире ежегодно регистрируется примерно 340 млн. несчастных случаев и 160 млн. жертв профессиональных заболеваний на предприятиях.

На сегодня около 370 тысяч работников работают во вредных и опасных условиях труда. Из них 44% находятся в условиях повышенного уровня шума и вибрации, под воздействием повышенной загазованности и запыленности рабочей зоны – каждый третий, тяжелым физическим трудом были заняты 84 тысячи человек. Из вышеперечисленного можно сделать вывод, что возникновению производственного травматизма способствуют пренебрежительное отношение к обеспечению безопасных условий труда как со стороны организаторов производства работ, так и самих работников.

Поэтому актуальным становятся разработки онлайн методов контроля и корректный анализ проблемы возможен лишь с учетом всех факторов возникновения травматизма, в целом энергопотребления, самоограничения в потреблении энергии с тем, чтобы избежать катастрофы глобального потепления.

На предприятиях энергетики аттестации рабочих мест по условиям труда отводится ведущая роль в системе работ по охране труда в организациях. На основании результатов проведения аттестации рабочих мест осуществляется разработка мер по улучшению условий труда, создается база данных по количеству травматизма и профзаболеваний, учета риска и утраты здоровья, работающих в нежелательных условиях с компенсацией. Аттестация рабочих мест по условиям труда является длительным трудоемким процессом, но она должна осуществляться в экономической деятельности с неоднородными рабочими местами.

Для АО «Алатау Жарық Компаниясы», электрические сети с различными напряжениями являются опасными производственными объектами, поэтому для них важным вопросом является аттестация рабочих мест, оценка риска утраты здоровья и травмирования работников, что поможет экономить средства на управление системой охраны труда.

В своих трудах как отечественных, так и зарубежных ученых: Абрамов Н.Р., Блин А.М., Габдрахманов Ф.И., Дюсебаев М.К., Зубкова А.Ф., Приходько Н.Г., Карнаух Н.Н., раскрыты исследования существующих проблем производственных условий на объектах, аттестации рабочих мест. В работах авторов: Ройк В.Д., Соловьев А.П., Файнбург Г.З. и др. раскрыты вопросы управления охраной труда и профессиональным риском [10-15].

Хотя в области охраны труда проводились глубокие исследования, тем не менее, на данном этапе требуются до сих пор изменения, которые повысили бы условия труда с внедрением улучшенных мероприятий по снижению профессиональных заболеваний работников и травматизма на рабочих местах.

Для проведения аттестации рабочих мест на предприятии ведутся работы по анализу условий труда и выявлению опасных производственных факторов с их измерением; тяжести и напряженности трудового процесса с оценкой системы обучения безопасным методам труда, а также обеспеченности работников средствами индивидуальной защиты.

При этом выполнение таких инструментальных измерений, которые являются достаточно сложными, это и приводит к повышенной стоимости в целом аттестации рабочих мест.

По исследованию техники безопасности и охраны труда на предприятиях энергетики и разработки мероприятий для снижения травматизма и профзаболеваемости, проводился анализ условий труда.

Особенности при проведении аттестации рабочих мест по условиям труда: измерения производятся во время аттестации, сложности при выборе похожих рабочих мест,

воздействия на здоровье работников основного технологического оборудования; нечетко взаимосвязь аттестации рабочих мест и оценкой риска травматизма.

Когда имеются большое количество таких нестационарных рабочих мест и выполнение технико-экономической специфики могут встретиться сложности в ходе проверки и оценки условий рабочих мест.

В ходе исследований были выработаны рекомендации по аттестации рабочих мест по условиям труда для нестационарного рабочего места, где были учтены особенности технологических процессов и оборудования; определения таких же аналогичных рабочих мест; а также определены оценки риска производственного травматизма и потери работоспособности работниками данного предприятия и установлена их взаимосвязь.

Составленный Стандарт предприятия «Золотые правила безопасности» (далее – Стандарт) включает безопасность людей и сохранение их здоровья на АО «Алатау Жарык Компаниясы» (далее – Общество), а также работающих на предприятии, которые являются подрядными организациями Общества.

Требования данного Стандарта распространяются на все структурные подразделения Общества и подрядные организации при выполнении договорных работ при ответственности Общества, если это не противоречит общим договорным условиям.

В данный Стандарт входят нормы культуры безопасности труда у работников Общества и подрядных организаций путем определения значительных требований безопасности труда и усиления мер дисциплинарного взыскания при их нарушении.

Поскольку Стандарт является нормативным документом, то его пересмотр возможен в следующих случаях:

- 1) когда происходят изменения по технике безопасности для работающих;
- 2) при стратегических изменениях в Политике Общества;
- 3) когда необходимо выполнение анализа эффективности системы управления охраной труда Общества.

Исследованы методы он-лайн мониторинга параметров условий труда в АО «АЖК» и выявлены условия труда и безопасности рабочего места с использованием программного обеспечения, с проведением необходимых расчетов за короткий срок для упрощения проведения процедуры аттестации рабочих мест.

Программное обеспечение включает в себя составления видов работ, схем и карты расположения рабочих мест, их размеры, и оборудования, а также проведение оценки по всем параметрам и условиям труда: опасных факторов производственной среды; по показателям тяжести и напряженности труда; по безопасности травмирования; имеющихся в наличии средств индивидуальной защиты для работников, а также подготовки отчетов для государственных органов надзора по проведению плановых аттестаций производственных объектов.

Анализ состояния производственного травматизма в АО «АЖК» за период с 2012 по 2021 годы в АО «АЖК» произошло 7 несчастных случаев, связанных с трудовой деятельностью. При этом пострадало 7 работников АО «АЖК», из них 2 человека погибли и еще 3 получили тяжелые травмы (инвалидность). Несчастные случаи со смертельным исходом допустили: - Управление подстанций (29.12.2012г.), - РЭС-5 (07.06.2019г.). Несчастные случаи с тяжелым исходом допустили: - Есикский РЭС (29.05.2013г.), - СРП УП (30.12.2014г.), - Управление подстанций (02.06.2020г.) [18].

В результате выявлено, что за последние 5 лет самыми травмоопасными профессиями стали: электросварщик, электрослесарь распределительных устройств, электрослесарь по ремонту оборудования РУ. Отметим, что пострадавшие – квалифицированные работники с 3-ей группой по электробезопасности, в возрасте до 40 лет и с небольшим стажем работы. Несчастные случаи происходили в среду, в вечернее время, из 7 пострадавших – 4 электротравмы, 2 ожога и 1 падение с высоты (табл.).

Определены основные причины несчастных случаев в АО «АЖК»: прикосновение к токоведущим частям, некачественное выполнение организационных и технических мероприятий, изоляция которых повреждена, отсутствие или нарушение защитного заземления, ошибочная подача напряжения во время ремонтов или осмотров, воздействия шагового напряжения, а также отсутствие контроля со стороны уполномоченных лиц.

Краткая характеристика произошедших несчастных случаев

Summary of accidents that occurred

По занимаемым должностям	По квалификации
Мастер – 0 чел. Водитель ОВБ – 1 чел. Эл/монтер по экпл. РС – 2 чел. Эл/монтер РЗА – 1 чел. Эл/слесарь по рем. оборуд РУ – 2 чел. Эл/монтер по обсл. ПС – 1 чел	II группа по э/б – 0 чел. III группа по э/б – 5 чел. IV группа по э/б – 2 чел. V группа по э/б – 0 чел.
По возрасту	По времени происшествия
От 20 до 25 лет – 1 чел. От 26 до 30 лет – 3 чел. От 31 до 40 лет – 1 чел. От 41 до 50 лет – 1 чел. Свыше 50 лет – 1 чел.	До 10 часов – 0 чел. С 10 до 13 часов – 3 чел. С 13 до 16 часов – 1 чел. С 16 до 18 часов – 3 чел. С 18 до 21 часов – 0 чел.
По стажу работы в должности	По дням недели
До 1 года – 1 чел. От 1 до 3 лет – 2 чел. От 4 до 6 лет – 2 чел. От 7 до 10 лет – 2 чел. Свыше 10 лет – 0 чел.	Понедельник – 0 чел. Вторник – 1 чел. Среда – 3 чел. Четверг – 1 чел. Пятница – 1 чел. Суббота – 1 чел.
Виды травм	
Электротравмы – 4 чел. Падение – 1 чел. Физ. травма – 0 чел. Ожоги – 2 чел.	Со смертельным исходом – 2 чел. С тяжелым исходом – 3 чел. Травма средней тяжести – 1 чел. С легким исходом – 1

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Из таблицы можно сделать вывод, что количество пострадавших от несчастных случаев в возрастных категориях: 20-25 лет – 1 человек; 26-30 лет – 3 человека; 31-40 лет – 1 человек; 41-50 лет – 1 человек, а также свыше 50 лет – 1 человек.

Время произошедших несчастных случаев: утром до 10 часов – 0 человек; 10-13 часов – 3 человека; 13-16 часов – 1 человек; 16-18 часов – 3 человека; а также 18-21 часов – 0 человек.

Градации пострадавших по стажу работы: до 1 года – 1 человек; 1-3 года – 2 человека; 4-6 лет – 2 человека; 7-10 лет – 2 человека; больше 10 лет – 0 человек.

По дням недели: в понедельник – 0 человек; во вторник, четверг, пятницу и субботу – 1 человек; в среду – 3 человека.

Количество пострадавших по видам травм: электротравмы – 4 человека; падение, травмы средней и легкой тяжести – 1 человек; ожоги, со смертельным исходом – 2 человека; с тяжелым исходом – 3 человека.

Исследования были проведены по определению основных вредных условий труда с помощью программного обеспечения: микроклимата, освещенности, концентрации вредных веществ, шума, вибрации, электромагнитных полей.



Рис. 1. Занятость персонала во вредных условиях труда на АО «АЖК» за 2021 год Fig. 1. Employment of personnel in harmful conditions of work at AZK® for 2021

Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Одним из наиважнейших показателей состояния охраны труда на производстве, используемых в мировой практике, является показатель *Lost Time Injury Frequency Rate* (или сокращенно *LTIFR*). Он отражает частоту травм, влекущих за собой потерю трудоспособности. Также он представляет собой соотношение количества случаев потери трудового времени и общее количество отработанного времени в организации за отчетный год» [4, 6]. Поэтому были определены коэффициенты по количеству несчастных случаев на данном предприятии [7-9]:

Коэффициент частоты травм с временной потерей трудоспособности *LTIFR*» рассчитывается по формуле:

$$LTIFR = N_{\text{нс}} * 1000000/T, \quad (1)$$

где $\Sigma N_{\text{нс}}$ – количество несчастных случаев, приведших к потере трудоспособности на период более 24 часов (за отчетный период);

T – общая фактическая продолжительность рабочего времени персонала (в часах, за отчетный период).

Коэффициент частоты смертельных несчастных случаев, связанных с производственной деятельностью (*FIFR*)» рассчитывается по формуле:

$$FIFR = N_{\text{нс}} * 1000000/T, \quad (2)$$

где $\Sigma N_{\text{нс}}$ – количество смертельных несчастных случаев, связанных с производственной деятельностью;

T – общая фактическая продолжительность рабочего времени персонала (в часах, за отчетный период).

Доказана устойчивая работа программного обеспечения для быстрого определения необходимых параметров условий и безопасности труда для АО «АЖК», что поможет облегчить и процедуру аттестации рабочих мест.

Обсуждение (Discussions)

Результаты анализа показали, что в основные опасными факторами данного объекта: работа на высоте; движущиеся машины, механизмы; воздействие электрического тока; подъемно-транспортные устройства; подвижные элементы различного оборудования и другие.

Вредными для здоровья физическими факторами являются: повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны, высокая скорость движения воздуха, недостаточная освещенность на рабочих местах и путях движения [16].

Опасными и вредными производственными факторами также относятся кислоты и щелочи, пары в результате нагрева трансформаторного масла, что является причинами химических ожогов кожного покрова при соприкосновении с ними [17].

При отрицательных результатах анализа проверки и оценки соответствия работ по охране труда в организации установленным государственным нормативным требованиям охраны труда орган по сертификации должен принять решение об отказе в выдаче сертификата безопасности с обязательным указанием причин отказа.

При положительных результатах проверки и оценки соответствия работ по охране труда в организации установленным государственным нормативным требованиям охраны труда органу по сертификации следует оформить сертификат безопасности.

Срок действия сертификата безопасности устанавливается органом по сертификации с учетом результатов сертификации работ по охране труда в организациях, сроков действия государственных нормативных требований охраны труда и даты завершения организацией аттестации рабочих мест по условиям труда.

Предлагаемые авторами, основным методом исследования было принято разработка и применение систем предупреждения и локализации несчастных случаев, аварий, профилактической работы, контроля за состоянием производственной среды и соблюдения санитарно-гигиенических требований, применением с:

1) видеорегистраторами, которые служат для записи и анализа проведения инструктажей работникам, при выполнении и наблюдении хода работ повышенной опасности и в целом контроля безопасных и нештатных ситуаций методов при работе;

2) планшетами, предназначенными для энергопредприятий с IT-модулями с информационными базами;

3) программно-аппаратным комплектом для соблюдения правил техники безопасности работниками с использованием защитных касок со встроенными беспроводной связи для передачи оповещения.

Выводы (Conclusions)

Успешно решен вопрос выявления методов онлайн мониторинга комплексного влияния неблагоприятных факторов и условий труда, произошедших несчастных случаев на исследуемом объекте, особенно которые ведут к потере трудоспособности развитию профессиональных заболеваний.

На основе результатов исследований в АО «Алатау Жарык Компаниясы» определено количество человек, работающих во вредных условиях труда, проведен анализ и прогнозирование влияния среды обитания на здоровье населения, разработаны мероприятия по повышению и улучшению условий труда и средств управления безопасностью производства.

Таким образом, в данной статье дана краткая характеристика предприятия и определение основных неблагоприятных факторов и условий труда; проведен расчет количества несчастных случаев на данном предприятии; даны рекомендации по снижению негативного влияния неблагоприятных факторов на здоровье работающих; по соблюдению трудовой дисциплины, своевременного устранения неполадок в работе оборудования и соблюдения техники безопасности

Результаты данных исследований могут быть использованы при учете профзаболеваний и несчастных случаев на других энергопредприятиях по уменьшению утомляемости, к меньшему числу профессиональных заболеваний и уровню травматизма на рабочих местах.

Литература

1. Петров, О. П. Производственный травматизм на предприятиях энергетики / О. П. Петров. Текст : непосредственный // Молодой ученый. 2020. № 16 (306). С. 158-160. URL: <https://moluch.ru/archive/306/68913/> (дата обращения: 13.02.2021).
2. Источник: <https://kadry.mcfr.kz/news/1904-monitoring-proizvodstvennogo-travmatizma-na-energopredpriyatiyah/> (дата обращения: 13.02.2021).
3. Янчий С. В. Анализ причин производственного травматизма в организации на основе применения статистического метода / С. В. Янчий, Н. Д. Дегтярев. Текст : непосредственный // Молодой ученый. 2017. № 4 (138). С. 95-100. URL: <https://moluch.ru/archive/138/38850/> (дата обращения: 14.02.2021).
4. Источник: <https://clubtk.ru/koeffitsient-chastoty-proizvodstvennogo-travmatizma/> (дата обращения: 15.02.2021).
5. Elavsky S, Email Author, Jandačková V., et al. Physical activity in an air-polluted environment: behavioral, psychological and neuroimaging protocol for a prospective cohort study (Healthy Aging in Industrial Environment study. Program 4). BMC Public Health. V. 21, Issue 1, December 2021, Номер статьи 126.

6. Mohandes S.R., Zhang X. Developing a Holistic Occupational Health and Safety risk assessment model: An application to a case of sustainable construction project. Journal of Cleaner Production Volume 291, 1 April 2021.
7. Schmoll M., Le Guillou R., Lobato Borges D. Standardizing fatigue-resistance testing during electrical stimulation of paralysed human quadriceps muscles, a practical approach. - Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. V. 18, Issue 1, December 2021.
8. Campo G., Cegolon L., Merich D. The italian national surveillance system for occupational injuries: Conceptual framework and fatal outcomes, 2002–2016. - International Journal of Environmental Research and Public Health. V. 17, Issue 20, 2 October 2020. C. 1-21.
9. Pasculescu V.M., Morar M.S., Pasculescu, D., Suvar, M.C., Tuhut, L.I. Occupational health and safety risk assessment for preventing electrical injury in underground mining. - International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM Volume 19, Issue 1.3, 2019, Pages 455-462 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2019; Albena; Bulgaria; 30 June 2019 до 6 July 2019.
10. The impact of electronic monitoring on employees' job satisfaction, stress, performance, and counterproductive work behavior: A meta-analysis Rudolf Siegel, Cornelius J. König, Veronika Lazar Saarland University, Germany. Computers. Human Behavior Reports: [www.sciencedirect.com/journal/computers-in-human-behavior-reports](https://doi.org/10.1016/j.chbr.2022.100227).
<https://doi.org/10.1016/j.chbr.2022.100227>
11. Воронин А.В. В сторону безопасного мышления // Информационно-консультативное издание по промышленной и экологической безопасности. Технадзор, 2017. №8 (129). С. 36-37.
12. Лопанов, А. Н. Мониторинг и экспертиза безопасности жизнедеятельности / А. Н. Лопанов. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2013 - Книга находится в Премиум-версии ЭБС IPRbooks. Рус яз.
13. Разумов Р.В., Михайлов А.В., Соловьев М.Ю., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. Системы мониторинга высоковольтного энергетического оборудования. <https://energybase.ru/news/articles/monitoring-systems-for-high-voltage-power-equipment-2020-03-16>
14. Соколова Э.И. Условия труда как индикатор безопасности / Соколова Э.И. // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: сборник материалов VII Международной научно-практической конференции / под. Ред. А.И. Сидорова. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. С.177-182.
15. Имангазин М.К., Соколова Э.И. Риск травмирования электротехнического персонала ОАО «ММК» / Соколова Э.И., Имангазин М.К. // Электробезопасность. г. Челябинск.: ЮУрГУ, 2016. №1. С.37-41.
16. Бикмухаметов М.Г., Соколова Э.И. Сравнительный анализ травматизма по видам происшествий и причинам несчастных случаев / Э.И. Соколова, М.Г. Бикмухаметов // Техносферная безопасность: сборник статей проблемам техносферной безопасности, посвященный 40-летию образования в Академии труда и социальных отношений кафедры охраны труда. М.: ООО «ИТЕП». 2011 С.28-31.
17. Баранов Ю.В. Актуальные проблемы в сфере охраны труда: анализ, оценки, решения // Социально-трудовые исследования. 2021 №1. С.45-56.
18. Ежегодные отчеты АО «АЖК» за период с 2012 по 2021 годы.

Авторы публикации

Абикенова Асель Амангельдиевна – канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой «Инженерная экология и безопасность труда» (ИЭБТ) Некоммерческого АО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева» (АУЭС). E-mail: a.abikenova@aes.kz

Жандаулетова Фарида Рустембековна – канд. техн. наук, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» (ИЭБТ) Некоммерческого АО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева» (АУЭС). E-mail: f.zhandauletova@aes.kz

Санатова Тоты Сабировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» (ИЭБТ) Некоммерческого АО «Алматинский университет

энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева» (АУЭС). E-mail: t.sanatova@aes.kz

Остемир Гаухар Серикқызы – магистрантка 2-го курса кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» (ИЭБТ) Некоммерческого АО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева» (АУЭС). E-mail: g.ostemir@aes.kz

Reference

1. Petrov OP. Proizvodstvennyj travmatizm na predpriyatiyah energetiki. *Young scientist*.2020;16 (306):158-160. Available at: URL: <https://moluch.ru/archive/306/68913/> (accessed to: 13.02.2021).
2. Source:<https://kadry.mcf.kz/news/1904-monitoring-proizvodstvennogo-travmatizma-naenergopredpriyatiyah>. (accessed to: 13.02.2021).
3. YAnchij SV. Analiz prichin proizvodstvennogo travmatizma v organizacii na osnove primeneniya statisticheskogo metoda. S.V. YAnchij, N.D. Degtyarev. *Young scientist*.2017;4 (138):95-100. URL: <https://moluch.ru/archive/138/38850/> (accessed to: 14.02.2021).
4. Source:<https://clubtk.ru/koeffitsient-chastoty-proizvodstvennogo-travmatizma> [Occupational injury frequency factor] (accessed to: 15.02.2021).
5. Elavsky S, Jandačková V, Knapová L, et al. *Physical activity in an air-polluted environment: behavioral, psychological and neuroimaging protocol for a prospective cohort study* (Healthy Aging in Industrial Environment study – Program 4). BMC Public Health. V. 21, Issue 1, December 2021.
6. Mohandes SR, Zhang X. Developing a Holistic Occupational Health and Safety risk assessment model: An application to a case of sustainable construction project. *Journal of Cleaner Production*. V. 291, 1 April 2021.
7. Schmoll M, Le Guillou R, Lobato Borges D. Standardizing fatigue-resistance testing during electrical stimulation of paralysed human quadriceps muscles. a practical approach. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. V. 18, Issue 1, December 2021.
8. Campo G, Cegolon L, Merich D. The italian national surveillance system for occupational injuries: Conceptual framework and fatal outcomes, 2002–2016. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. V. 17, Issue 20, 2 October 2020. P. 1-21.
9. Pasculescu VM, Morar MS, Pasculescu D, et al. *Occupational health and safety risk assessment for preventing electrical injury in underground mining*. - International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEMVolume 19, Issue 1.3, 2019, Pages 455-46219th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2019; Albena; Bulgaria; 30 June 2019 до 6 July 2019; Code 150485.
10. Rudolf Siegel, Cornelius J. König, Veronika Lazar. *The impact of electronic monitoring on employees' job satisfaction, stress, performance, and counterproductive work behavior: A meta-analysis*. Saarland University, Germany. Computers. Human Behavior Reports: [www.sciencedirect.com/journal/computers-in-human-behavior-reports](https://doi.org/10.1016/j.chbr.2022.100227). <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2022.100227>
11. Voronin AV. Towards safe thinking. Information and advisory publication on industrial and environmental safety. *Technical Supervision*. 2017;8 (129):36-37
12. Lopanov AN. *Monitoring and examination of life safety*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, EBS DIA. 2013. The book is in the Premium version of EBS IPRbooks.
13. Razumov RV, Mikhailov AV, Solovyov MYu. ООО NPP «EKRA», Cheboksary, Russia. *Monitoring systems of high-voltage power equipment*. <https://energybase.ru/news/articles/monitoring-systems-for-high-voltage-power-equipment-2020-03-16>
14. Sokolova EI. *Working conditions as an indicator of safety. Life safety in the third millennium: a collection of materials of the VII International Scientific and Practical Conference / edited by A.I. Sidorov*. Chelyabinsk: SUSU Publishing Center. 2019. pp.177-182.
15. Imangazin MK, Sokolova EI. Risk of injury to electrical personnel of OJSC MMK / Sokolova E.I., Imangazin M.K. *Electrical safety*. Chelyabinsk.: SUSU. 2016;1:37-41.
16. Bismukhametov MG, Sokolova EI. *Comparative analysis of injuries by types of accidents and causes of accidents*. Technosphere safety: a collection of articles on the problems of technosphere safety, dedicated to the 40th anniversary of education at the Academy of Labor and Social Relations of the Department of Labor Protection. M.: LLC «ITEP». 2011.p.28-31.

17. Baranov YuV. Actual problems in the field of labor protection: analysis, evaluation, solutions. *Social and labor research*. 2021;1:45-56.

18. Annual reports of JSC «AZHK» for the period from 2012 to 2021.

Authors of the publication

Asel A. Abikenova – Almaty University of Energy and Communications named after Gumarbek Daukeev, Almaty, Kazakhstan. E-mail: a.abikenova@aes.kz

Farida R. Zhandauletova – Almaty University of Energy and Communications named after Gumarbek Daukeev, Almaty, Kazakhstan). E-mail: f.zhandauletova@aes.kz

Toty S. Sanatova – Almaty University of Energy and Communications named after Gumarbek Daukeev, Almaty, Kazakhstan. E-mail: t.sanatova@aes.kz

Gauhar S. Ostemir – Almaty University of Energy and Communications named after Gumarbek Daukeev, Almaty, Kazakhstan. E-mail: g.ostemir@aes.kz

Шифр научной специальности:

2.10.2. Экологическая безопасность

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

2.4.10. Техносферная безопасность

Получено

15.02.2023г.

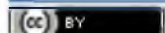
Отредактировано

22.02.2023г.

Получено

08.04.2023г.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 536.24

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186

ОЦЕНКА МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ ВНЕШНЕМ ОБТЕКАНИИ НАГРЕВАЕМОЙ ТРУБЫ

Бадретдинова Г.Р.¹, Калимуллин И.Р.², Зинуров В.Э.¹, Дмитриев А.В.¹

¹Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>, nice.badretdinova@mail.ru¹

ildarkalimullin@gmail.com²

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>, vadd_93@mail.ru³

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com⁴

Резюме: Исследование теплообменных процессов с помощью численного моделирования в программных комплексах представляет собой сложную операцию. В ходе проведения численных исследований по передаче тепла необходимо адекватно настроить решение задачи. Для этого подбираются наиболее подходящие модели турбулентности, создаются сеточные модели, задаются граничные условия. Получение достоверных результатов численного моделирования теплообменных процессов напрямую зависит от задания верных параметров, которые необходимо изначально проанализировать. По итогу работы над анализом необходимых параметров можно получить адекватное решение задачи. **ЦЕЛЬ.** Оценить влияние моделей турбулентностей на процесс теплоотдачи и подобрать наиболее подходящую модель для проведения численного моделирования внешнего обтекания нагреваемой трубы. Изучить влияние количественных критериев сеточной модели на точность и сходимость решения численного расчета. **МЕТОДЫ.** При проведении численного моделирования был использован метод конечных элементов в программном комплексе ANSYS Fluent. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В ходе проведения исследования была подобрана наиболее подходящая модель турбулентности для решения задачи внешнего обтекания нагреваемой трубы. Построена сеточная модель с учетом особенностей рассматриваемой задачи. Определены погрешности в зависимости от количественных критериев сеточной модели. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Проведенные численные исследования позволили дать сравнительную оценку для труб с различным оребрением. Полученные результаты показали, что замена труб с прямым оребрением на спиральное позволяет увеличить интенсивность теплоотдачи до 40%.

Ключевые слова: модель турбулентности; внешнее обтекание; оребренная труба; ортогональность; асимметрия; теплоотдача.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП – 3577.2022.1.

Для цитирования: Бадретдинова Г.Р., Калимуллин И.Р., Зинуров В.Э., Дмитриев А.В. Оценка моделей турбулентности при внешнем обтекании нагреваемой трубы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 176-186. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186.

EVALUATION OF TURBULENCE MODELS IN THE EXTERNAL FLOW AROUND THE HEATED PIPE

GR. Badretdinova¹, IR. Kalimullin², VE. Zinurov¹, AV. Dmitriev¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan Federal University

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>, nice.badretdinova@mail.ru¹
ildarkalimullin@gmail.com²

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>, vadd_93@mail.ru³

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, teremiada@gmail.com⁴

Abstract: The study of heat exchange processes using numerical modeling in software systems is a complex operation. In the course of conducting numerical studies on heat transfer, it is necessary to adequately adjust the solution of the problem. To do this, the most suitable turbulence models are selected, grid models are created, and boundary conditions are set. Obtaining reliable results of numerical simulation of heat exchange processes directly depends on setting the correct parameters that need to be analyzed initially. As a result of the work on the analysis of the necessary parameters, an adequate solution to the problem can be obtained. **THE PURPOSE.** To evaluate the influence of turbulence models on the heat transfer process and to select the most suitable model for numerical simulation of the external flow around the heated pipe. To study the influence of quantitative criteria of the grid model on the accuracy and convergence of the numerical calculation solution. **METHODS.** During the numerical simulation, the finite element method was used in the ANSYS Fluent software package. **RESULTS.** In the course of the study, the most suitable turbulence model was selected to solve the problem of external flow around the heated pipe. A grid model is constructed taking into account the features of the problem under consideration. The errors are determined depending on the quantitative criteria of the grid model. **CONCLUSION.** Numerical studies have made it possible to give a comparative assessment for pipes with different fins. The results obtained showed that replacing pipes with straight fins with spiral ones allows increasing the heat transfer intensity up to 40%.

Keywords: turbulence model; external flow; finned tube; orthogonality; skewness; heat transfer.

For citation: Badretdinova GR, Kalimullin IR, Zinurov VE, Dmitriev AV. Evaluation of turbulence models in the external flow around the heated pipe. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(2): 176-186. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186.

Введение (Introduction)

Во многих сферах промышленности теплообменник играет важную роль в обеспечении теплообмена между средой и поверхностью. Известны различные виды теплообменных аппаратов. Широкое применение имеют теплообменники с оребренной поверхностью труб различной конфигурацией в системах кондиционирования воздуха, охлаждения, в промышленных холодильных и криогенных установках, в химической промышленности и на тепловых станциях, в котельных и тепловых установках [1-3]. В промышленности часто встречаются трубы, на поверхности которых расположены ребра прямой, спиральной, волнистой, гофрированной, жалюзийной и перфорированной конфигурацией.

Эффективность процессов нагрева и охлаждения зависит от технологических и конструктивных параметров поверхности теплообмена. В работе [4] представлены исследования по изучению влияния шага, толщины и формы ребра на тепловой поток. Выявлено, что использование волнистых и гладких ребер приводит к увеличению площади теплоотдачи, использование жалюзийных и щелевых ребер приводят к повышению коэффициента теплопередачи. В работе [5] рассматриваются результаты исследований по влиянию продольного и поперечного шага и угла волнистости ребер на процесс теплопередачи и перепад давления.

В работе [6] с помощью численного моделирования было исследовано влияние количества рядов, диаметра и шага труб, шага и материала ребер на процесс теплоотдачи в теплообменнике с оребренными трубами. В ходе исследования получены зависимости исследуемых параметров от числа Нуссельта (Nu) и коэффициента трения. Выявлено, что с увеличением числа рядов труб число Нуссельта и коэффициент трения уменьшаются. Увеличение диаметра трубы или шага ребер приводит к снижению коэффициента теплопередачи. Однако замечено, что влияние шага труб меньше, чем влияние диаметра трубы и шага ребра. Для исследования влияния материала ребра рассматривались медь и алюминий. Установлено, что коэффициент теплопередачи

может быть увеличен за счет снижения термического сопротивления для ребра с большей теплопроводностью материала.

В работе [7] разработана методика оценки среднего коэффициента теплопередачи и общей эффективности ребер пластинчато-ребристого теплообменника. Метод основан на экспериментальных и численных данных, определяющие общую эффективность ребер и усредненный коэффициент теплоотдачи. Разработанная методология проверена путем сравнения результатов с корреляциями, предложенными авторами работ [8] для алюминиевых ребер. Исследование показало, что число Нуссельта зависит в первую очередь от конструкции ребер и технологических параметров потока.

Влияние воздушного потока на процесс теплообмена исследуется и авторами [9], утверждающие, что вторичный поток может усилить конвективный теплообмен. В своем исследовании они представили взаимосвязь между числом Нуссельта и силой вторичного потока. Подобные исследования были проведены в работах [10-11]. Исследование [12] посвящено изучению влияния потока, создаваемого вихревым генератором на характеристики теплопередачи и характеристики потока для теплообменников с оребренными трубками. Результаты показали, что общий теплообмен по всей стенке канала увеличивается до 43,66 %.

Исследования по влиянию форм ребер на процесс теплопередачи рассматривались многими авторами [13, 14]. В работе [15] исследовали ребро с круглой, квадратной и треугольной формой перфорации с целью изучения их влияния на характеристики течения и повышение теплообмена. Результаты показывают значительное увеличение числа Нуссельта на 8,5%, 13,6% и 18,4% при использовании круглой, квадратной и треугольной перфорации соответственно. Следовательно, треугольная форма перфорации обеспечивает более высокое увеличение скорости теплопередачи. В работе [16] для улучшения процесса теплопередачи пластинчато-ребристого теплообменника были предложены и исследованы три новых типа волнистых пластинчатых ребер, а именно перфорированные, ступенчатые и прерывистые. Установлено, что за счет завихрения потока и эффективного перемешивания жидкости, предлагаемые методы улучшения теплопередачи имеют преимущества по сравнению с традиционными волнистыми ребрами. Авторы пришли к выводу, что перфорация полезна для улучшения теплопередачи и улучшения числа Нуссельта.

В статье [17] исследовалось влияние радиальных и осевых ребер и их угол наклона в отношении процесса теплопередачи. Также экспериментально была исследована естественная конвекция и радиационный теплообмен от оребренных и неоребранных трубчатых теплообменников. Установлено, что скорость теплопередачи от теплообменника с радиальным оребрением уменьшается, а от теплообменника с аксиальным оребрением увеличивается по мере усиления угла наклона по отношению к горизонтальной плоскости. Максимальное число Нуссельта, равное значению 355 достигается при угле наклона 0° для теплообменника с радиальным оребрением и 408 для теплообменника с осевым оребрением при угле наклона 90° .

Экспериментальным путем в [18] было проведено исследование влияния высоты ребер труб теплообменника при числах Рейнольдса меньше 2000 на тепловую мощность горизонтального однорядного пучка, габаритные и металлоемкостные характеристики. Была определена эффективная высота ребра на поверхности трубы, значение которой составляет 8 мм.

В [19] авторами статьи было проведено исследование аэродинамических и теплотехнических характеристик оребренной поверхности цилиндра в условиях его внутреннего нагрева и обтекания воздушным потоком. Были получены поля скоростей потока вблизи изотермического и неізотермического ребер, температурное поле на его поверхности и значения плотности теплового потока. В ходе проведения эксперимента исследователями было установлено влияние высоты ребра на структуру потока и распределение коэффициента теплоотдачи, изменения угла атаки между вектором скорости воздушного потока и осью цилиндра на средний коэффициент теплоотдачи, причем получено, что для неізотермического ребра он увеличивается до 6,5%. Также определено, что средний коэффициент теплоотдачи на верхней поверхности ребра больше, чем на нижней при значении числа Рейнольдса, равное 4000, и он увеличивается с углом атаки. Однако при возрастании скорости набегающего потока наибольший средний коэффициент теплоотдачи достигается на нижней поверхности ребра.

Цель статьи заключается в подборе наиболее подходящей модели турбулентности и создании сеточной модели, влияющие на адекватность численного решения, при

проведении численного моделирования внешнего обтекания нагреваемой трубы. В данном исследовании планируется использовать полученные результаты для проведения сравнение интенсивности теплоотдачи от воздуха к поверхности трубы с различным оребрением.

Материалы и методы (Materials and methods)

Исследования в данной статье были проведены для теплообменного аппарата, установленного на предприятии «ПАЛП Инвест» (рис. 1.) с целью оптимизации работы.



Рис. 1. Теплообменный аппарат, установленный на предприятии «ПАЛП Инвест» Fig. 1. Heat exchanger installed at the «PULP Invest» enterprise

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

При проведении численных расчетов сперва был рассчитан коэффициент теплоотдачи α_p [Вт/м²·К] при обтекании цилиндрической трубы по методике А.А. Жукаускаса [20] в качестве сравнительного эталона. Полученные им зависимости широко применяются в практических расчетах:

$$5 < Re < 10^3 \quad Nu_{\text{ж}} = 0,5 Re^{0,5} Pr_{\text{ж}}^{0,38} \left(\frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (1)$$

$$10^3 < Re < 2 \cdot 10^5 \quad Nu_{\text{ж}} = 0,25 Re^{0,6} Pr_{\text{ж}}^{0,38} \left(\frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (2)$$

$$2 \cdot 10^5 < Re < 2 \cdot 10^6 \quad Nu_{\text{ж}} = 0,023 Re^{0,8} Pr_{\text{ж}}^{0,38} \left(\frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (3)$$

Полученные в ходе расчета значения коэффициентов теплоотдачи α_p приведены в таблицах 2-5 в зависимости от задаваемой входной скорости потока W , м/с.

Для реализации численных расчетов в программном комплексе ANSYS Fluent была построена трехмерная модель трубы без оребрения и создана расчетная сетка с учетом особенностей течения, представленная на рис. 2. Количество элементов в расчетной сетке изменялось в диапазоне от 3744 до 2546817. При генерации расчетной сетки рассчитывались такие критерии, как ортогональность и асимметрия (skewness), по которым оценивается качество сетки. В конце каждого расчета, помимо коэффициента теплоотдачи, определялось безразмерное значение длины y^+ – соотношение между турбулентными и ламинарными воздействиями в ячейке. Если y^+ имеет большое значение, то ячейка принимается турбулентной, а если y^+ имеет маленькое значение, то ламинарной.

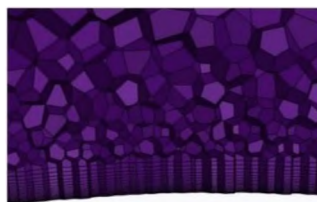


Рис. 2. Сеточная модель [составлено автором] Fig. 2. Grid model [compiled by the author]

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

При проведении расчетов рассматривались следующие модели турбулентности: Spalart-Allmaras, $k-\omega$, $k-\omega$ standard, $k-\omega$ SST, $k-\omega$ BSL, $k-\epsilon$ standard, $k-\epsilon$ RNG, $k-\epsilon$ Realizable и Transition $k-k\ell-\omega$. Также применялась модель laminar. Для упрощения задачи принималось, что температура на стенках трубы имеет постоянное значение $t_w = 20$ °С. На входе в воздуховод поступал газ с температурой 200 °С. Скорость потока изменялась от 1 до 30 м/с. На выходе из воздуховода задавалось атмосферное давление.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Результаты численных расчетов различных моделей турбулентности и laminar представлены в таблице 1. В ходе исследования установлено, что наиболее подходящей моделью турбулентности является Spalart-Allmaras.

Таблица 1
Table 1Сравнение различных моделей турбулентности
Comparison of different turbulence models

W , м/с	α , Вт/(м ² ·°С)	Погрешность	Q , Вт	y^+ (max)	Модель турбулентности
1	22,83	16,4	2,16	0,45	$k-\omega$
10	85,99	11,58	8,14	2,26	
20	142,01	18,85	13,44	4,49	
30	200,4	26,65	18,97	6,4	
1	22,29	14,36	2,11	0,45	<i>Spalart-Allmaras</i>
10	75,2	-1,1	7,12	2,48	
20	115,3	0,02	10,91	4,25	
30	153,7	4,39	14,55	5,85	
1	22,57	15,42	2,14	–	<i>laminar</i>
10	71,5	-6,33	6,77	–	
20	103,5	-11,32	9,8	–	
30	130,7	-12,49	12,37	–	
1	26,89	29,01	2,55	0,49	$k-\epsilon$ standard
10	134,1	43,31	12,69	3,04	
20	215,9	46,63	20,44	5,11	
30	282,5	47,97	26,74	6,85	
1	27,75	31,20	2,63	0,49	$k-\epsilon$ RNG
10	128,9	40,996	12,2	3,01	
20	199,3	42,17	18,86	5,04	
30	253,8	42,08	24,02	6,74	
1	26,27	27,33	2,49	0,48	$k-\epsilon$ Realizable
10	123,02	38,2	11,64	2,93	
20	197,1	41,53	18,65	4,92	
30	258,2	43,08	24,44	6,59	
1	22,95	16,82	2,17	0,45	$k-\omega$ Standard
10	91,61	17,01	8,67	2,55	
20	156,1	26,18	14,78	4,57	
30	221,3	33,58	20,94	6,49	
1	22,75	16,10	2,15	0,45	$k-\omega$ SST
10	85,93	11,52	8,13	2,53	
20	141,9	18,79	13,43	4,49	
30	200,1	26,54	18,94	6,4	
1	23,11	17,41	2,19	0,45	$k-\omega$ BSL
10	99,33	23,46	9,4	2,6	
20	175,1	34,17	16,57	4,71	
30	247,6	40,62	23,43	6,65	
1	22,81	16,32	2,16	0,46	<i>Transition k-kl-ω</i>
10	99,45	23,55	9,41	2,58	
20	159,07	27,55	15,05	4,4	
30	240,1	39,87	23,43	3,80	

В ходе проведения исследования авторами было определено влияние качества сетки на коэффициент теплоотдачи. Качество сеточной модели определяет точность результатов и адекватность численного моделирования по различным количественным критериям, таким как ортогональность и асимметрия (skewness). Данные критерии в численном моделировании позволяют получить наилучшую сходимость решения.

Полученные результаты погрешностей измерения при входных скоростях газового потока 1, 10, 20, 30 м/с соответственно приведены в таблицах 2-5. По проведенным расчетам видно, что результаты существенным образом зависят от качества сетки, нежели от количества элементов. Например, при ортогональности более 0,5 погрешность между вычислениями коэффициента теплоотдачи численным и расчетным путями составляют в большинстве случаев менее 7 – 10 % при скоростях потока более 10 м/с.

Таблица 2

Table 2

Определение погрешности при входной скорости газа $W = 1$ м/с

Error determination at gas input rate $W = 1$ m/s

W , м/с	α_p , Вт/(м ² ·°С)	α_s , Вт/(м ² ·°С)	Погрешность	Q , Вт	y^+ (max)	Количество ячеек	Ортогональность	Skewness
1	19,09	27,02	29,34	2,6	5,74	3744	0,65	0,015 (0,35)
		23,82	19,84	2,3	1,84	27516	0,4	0,007(0,409)
		23,03	17,11	2,2	0,275	153000	0,51	0,012
		22,29	14,36	2,1	0,452	263072	0,47	0,011(0,484)
		22,8	16,28	2,2	0,209	309835	0,54	0,012 (0,45)
		23,16	17,58	2,2	1,54	609744	0,38	0,0107(0,517)
		22,89	16,59	2,2	0,083	850020	0,29	0,01 (0,478)
		22,29	14,37	2,1	0,45	1102521	0,44	0 (0,34)
		22,5	15,14	2,1	0,045	2546817	0,42	0,0145 (0,54)

Таблица 3

Table 3

Определение погрешности при входной скорости газа $W = 10$ м/с

Error determination at gas input speed $W = 10$ m/s

W , м/с	α_p , Вт/(м ² ·°С)	α_s , Вт/(м ² ·°С)	Погрешность	Q , Вт	y^+ (max)	Количество ячеек	Ортогональность	Skewness
10	76,03	81,38	6,6	7,7	30,46	3744	0,65	0,015 (0,35)
		93,45	18,64	8,84	9,54	27516	0,4	0,007(0,409)
		78,24	2,83	7,41	1,52	153000	0,51	0,012
		75,2	1,1	7,12	2,48	263072	0,47	0,011(0,484)
		77,6	2,02	7,34	1,16	309835	0,54	0,012 (0,45)
		79,15	3,94	7,49	1,42	609744	0,38	0,0107(0,517)
		80,95	6,08	7,66	0,45	850020	0,29	0,01 (0,478)
		76,15	0,16	7,21	2,5	1102521	0,44	0 (0,34)
		77,66	2,1	7,35	0,25	2546817	0,42	0,0145 (0,54)

Таблица 4

Table 4

Определение погрешности при входной скорости газа $W = 20$ м/с*Error determination at gas input speed $W = 20$ m/s*

W , м/с	α_{p2} , Вт/(м ² ·°С)	α_2 , Вт/(м ² ·°С)	Погрешность	Q , Вт	y^+ (max)	Количество ячеек	Ортогональ- ность	Skewness
20	115,248	122,2	5,69	11,57	55,77	3744	0,65	0,015 (0,35)
		147,03	21,62	13,92	16,71	27516	0,4	0,007(0,409)
		119,05	3,19	11,27	2,61	153000	0,51	0,012
		115,3	0,02	10,91	4,25	263072	0,47	0,011(0,484)
		120,1	4,003	11,36	1,96	309835	0,54	0,012 (0,45)
		125,1	7,84	11,84	1,42	609744	0,38	0,0107(0,517)
		132,03	12,71	12,50	0,77	850020	0,29	0,01 (0,478)
		116,6	1,15	11,03	4,27	1102521	0,44	0 (0,34)
		120,3	4,24	11,39	0,43	2546817	0,42	0,0145 (0,54)

Таблица 5

Table 5

Определение погрешности при входной скорости газа $W = 30$ м/с*Error determination at gas input speed $W = 30$ m/s*

W , м/с	α_{p2} , Вт/(м ² ·°С)	α_2 , Вт/(м ² ·°С)	Погрешность	Q , Вт	y^+ (max)	Количество ячеек	Ортогональнос- ть	Skewness
30	146,99	157,84	6,87	14,94	79,53	3744	0,65	0,015 (0,35)
		188,41	21,98	17,83	22,68	27516	0,4	0,007(0,409)
		154,27	4,72	14,6	3,57	153000	0,51	0,012
		153,74	4,39	14,55	5,85	263072	0,47	0,011(0,484)
		156,6	6,13	14,82	2,68	309835	0,54	0,012 (0,45)
		166,38	11,65	15,75	1,95	609744	0,38	0,0107(0,517)
		171,51	14,3	16,23	1,07	850020	0,29	0,01 (0,478)
		154,8	5,04	14,65	5,8	1102521	0,44	0 (0,34)
		157,44	6,64	14,9	0,59	2546817	0,42	0,0145 (0,54)

Проведенные авторами исследования позволили в данной статье провести сравнение интенсивности теплоотдачи при различных числах Рейнольдса (Re) для нагреваемой трубы с оребрением. На рисунке 3 представлено различное оребрение труб. Количество ребер в расчетной области принималось равным 9 шт.

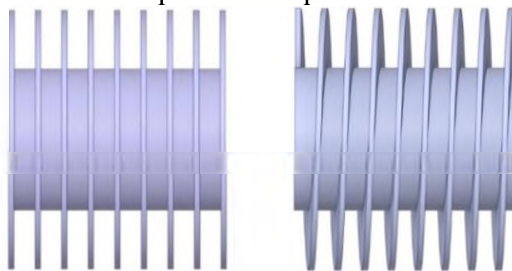


Рис. 3. Различные виды оребрения трубы: 1 – прямые; 2 – спиральные
Fig. 3. Various types of pipe fins:
1 – straight; 2 – spiral

*Источник: составлено автором. *Source:
compiled by the author

При численном моделировании принималось, что температура воды составляет 14°C. Остальные параметры принимались и изменялись аналогично вышеизложенному описанию. С учетом полученных результатов исследований была создана расчетная область трубы с оребрением, представленная на рисунке 4.

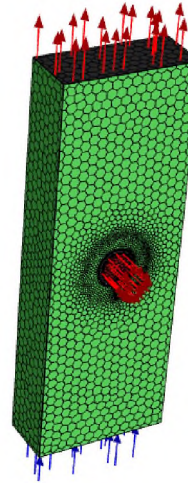


Рис. 4. Расчетная модель трубы с оребрением *Fig. 4. Calculation model of a finned pipe*
 *Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

На графике рис. 5 представлен результат сравнения различных видов оребрения трубы.

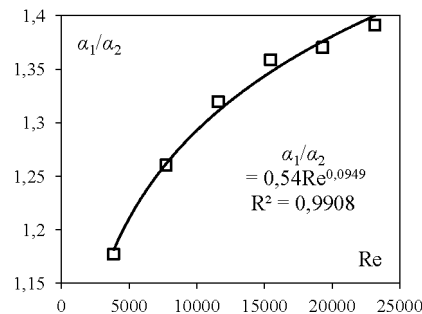


Рис.5. Сравнение интенсивности теплоотдачи α_1/α_2 при различных числах Рейнольдса (Re) *Fig. 5. Comparison of heat transfer intensity α_1/α_2 at different Reynolds numbers (Re)*

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Из рисунка 5 следует, что интегральный коэффициент теплоотдачи от поверхности оребренных труб может быть увеличен до 40% при замене прямых ребер на спиральные. Причем выявлена зависимость:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = 0,54 Re^{0,095} \quad (4)$$

Закключение (Conclusion)

В настоящее время решению задач с внешним обтеканием тел с помощью численного моделирования в программных комплексах уделяется большое внимание, что подтверждается вышеизложенным литературным обзором. При проведении численных исследований подобных задач важно учитывать особенности гидро- и газодинамики, а также процессов теплообмена.

В статье были исследованы существующие модели турбулентности, сравнение которых позволило установить, что наиболее подходящей для решения задачи внешнего обтекания нагреваемой трубы является модель *Spalart-Allmaras*. Исследования влияния характеристик сеточной модели показали, что результаты существенно зависят от качества сетки, а не от количества элементов.

Таким образом, полученные данные позволили провести численное сравнение труб с различным оребрением. Установлено, что трубы со спиральным оребрением дают

увеличение интенсивности теплоотдачи до 40% по сравнению с прямым оребрением.

Литература

1. Taler D. Determining velocity and friction factor for turbulent flow in smooth tubes // *International Journal of Thermal Sciences*. 2016. Vol. 105. pp. 109–122.
2. Taler D. Mathematical modeling and experimental study of heat transfer in a low-duty air-cooled heat exchanger // *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 159. pp. 232–243.
3. Taler D., Taler J. Prediction of heat transfer correlations in a low-loaded plate-fin-and-tube heat exchanger based on flow-thermal tests // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 148. pp. 641–649.
4. Sadeghianjahromi A., Wang C.C. Heat transfer enhancement in fin-and-tube heat exchangers—A review on different mechanisms // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 137. pp. 110470.
5. Bhuiyan A.A., Islam A.K.M.S. Thermal and hydraulic performance of finned-tube heat exchangers under different flow ranges: A review on modeling and experiment // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 101. pp. 38–59.
6. Xie G., Wang Q., Sunden B. Parametric study and multiple correlations on air-side heat transfer and friction characteristics of fin-and-tube heat exchangers with large number of large-diameter tube rows // *Applied Thermal Engineering*. 2009. Vol. 29. N1. pp. 1–16.
7. González A.M., Vaz Jr M., Zdanski P.S.B. A hybrid numerical-experimental analysis of heat transfer by forced convection in plate-finned heat exchangers // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 148. pp. 363–370.
8. Kaminski S., Groß U. Luftseitiger Wärmeübergang und Druckverlust in Lamellenrohr-Wärmeübertragern // *KI. Luft-und Kältetechnik*. 2000. Vol. 36. N1. pp. 13–18.
9. Chang L.M., Wang L.B., Song K.W., et al. Numerical study of the relationship between heat transfer enhancement and absolute vorticity flux along main flow direction in a channel formed by a flat tube bank fin with vortex generators // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009. Vol. 52. N7-8. pp. 1794–1801.
10. Du X., Feng L., Li L., et al. Heat transfer enhancement of wavy finned flat tube by punched longitudinal vortex generators // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 75. pp. 368–380.
11. Carpio J., Valencia A. Heat transfer enhancement through longitudinal vortex generators in compact heat exchangers with flat tubes // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 120. pp. 105035.
12. Tepe A.Ü. Heat transfer enhancement of fin-tube heat exchangers using punched triangular ramp vortex generator on the fin surface // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 174. pp. 121326.
13. Dhanawade K.H., Sunnapwar V.K., Dhanawade H.S. Optimization of design parameters for lateral circular perforated fin arrays under forced convection // *Heat Transfer—Asian Research*. 2016. Vol. 45. N1. pp. 30–45.
14. Webb R.L. Air-side heat transfer in finned tube heat exchangers // *Heat Transfer Engineering*. – 1980. Vol. 1. N3. pp. 33–49.
15. Zaidan M.H., Alkumait A.A.R., Ibrahim T.K. Assessment of heat transfer and fluid flow characteristics within finned flat tube // *Case studies in thermal engineering*. 2018. N12. pp. 557–562.
16. Xue Y., Ge Z., Du X., et al. On the heat transfer enhancement of plate fin heat exchanger // *Energies*. 2018. Vol. 11. N6. pp. 1398.
17. Sertkaya A.A., Sari S. Experimental investigation of heat transfer depending on inclination angle of unfinned, axial finned and radial finned heat exchangers // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 165. pp. 120704.
18. Сухоцкий А.Б., Данильчик Е.С. Конвективная теплоотдача однорядных пучков из труб с накатными алюминиевыми ребрами различной высоты при малых числах Рейнольдса // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2021. Т. 64. №. 4. С. 336–348.
19. Гусаков А. А., Греков М. А., Сероштанов В. В. Аэродинамика и теплообмен на поверхности одиночного кольцевого ребра // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки*. 2018. Т. 11. №. 2. С. 151–164.
20. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.

Авторы публикации

Бадретдинова Гузель Рамилевна – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

Калимуллин Ильдар Рамилевич – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Энергобезопасность», Казанский (Приволжский) федеральный университет.

Зинуров Вадим Эдуардович – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Taler D. Determining velocity and friction factor for turbulent flow in smooth tubes. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016;105:109-122. doi <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.02.011>
2. Taler D. Mathematical modeling and experimental study of heat transfer in a low-duty air-cooled heat exchanger. *Energy Conversion and Management*. 2018;159:232-243. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.018>
3. Taler D, Taler J. Prediction of heat transfer correlations in a low-loaded plate-fin-and-tube heat exchanger based on flow-thermal tests. *Applied Thermal Engineering*. 2019;148:641-649. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.060>
4. Sadeghianjahromi A, Wang CC. Heat transfer enhancement in fin-and-tube heat exchangers—A review on different mechanisms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;137:110470. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110470>
5. Bhuiyan AA, Islam AKMS. Thermal and hydraulic performance of finned-tube heat exchangers under different flow ranges: A review on modeling and experiment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016;101:38-59. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.022>
6. Xie G, Wang Q, Sunden B. Parametric study and multiple correlations on air-side heat transfer and friction characteristics of fin-and-tube heat exchangers with large number of large-diameter tube rows. *Applied Thermal Engineering*. 2009; 29(1):1-16. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.01.014>
7. González AM, Vaz Jr M, Zdanski PSB. A hybrid numerical-experimental analysis of heat transfer by forced convection in plate-finned heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*. 2019;148:363-370. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.068>
8. Kaminski S, Groß U. Luftseitiger Wärmeübergang und Druckverlust in Lamellenrohr-Wärmeübertragern. *KI. Luft-und Kältetechnik*. 2000;36(1):13-18.
9. Chang LM, Wang LB, Song KW, et al. Numerical study of the relationship between heat transfer enhancement and absolute vorticity flux along main flow direction in a channel formed by a flat tube bank fin with vortex generators. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009;52(7-8):1794-1801. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.09.029>
10. Du X, Feng L, Li L, et al. Heat transfer enhancement of wavy finned flat tube by punched longitudinal vortex generators. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014;75:368-380. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.081>
11. Carpio J, Valencia A. Heat transfer enhancement through longitudinal vortex generators in compact heat exchangers with flat tubes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021;120:105035. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.105035>
12. Tepe AÜ. Heat transfer enhancement of fin-tube heat exchangers using punched triangular ramp vortex generator on the fin surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021;174: 121326. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121326>
13. Dhanawade KH, Sunnapwar VK, Dhanawade HS. Optimization of design parameters for lateral circular perforated fin arrays under forced convection. *Heat Transfer—Asian Research*. 2016;45(1):30-45. <https://doi.org/10.1002/htj.21150>
14. Webb R.L. Air-side heat transfer in finned tube heat exchangers. *Heat Transfer Engineering*. 1980;1(3):33-49. <https://doi.org/10.1080/01457638008939561>
15. Zaidan MH, Alkumait AAR, Ibrahim TK. Assessment of heat transfer and fluid flow characteristics within finned flat tube. *Case studies in thermal engineering*. 2018;12:557-562.

<https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.07.006>

16. Xue Y, Ge Z, Du X, et al. On the heat transfer enhancement of plate fin heat exchanger. *Energies*. 2018;11(6):1398. <https://doi.org/10.3390/en11061398>

17. Sertkaya AA, Sari S. Experimental investigation of heat transfer depending on inclination angle of unfinned, axial finned and radial finned heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021;165:120704. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120704>

18. Sukhotski AB, Danil'chik ES. Convective Heat Exchange of Single-Row Bundles from Tubes with Rolled Aluminum Fins of Various Height at a Low Values of the Reynolds Number. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2021;64(4):336-348. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-336-348>

19. Gusakov AA, Grekov MA, Seroshtanov VV. Aerodynamics and heat transfer over the surface of a single circular fin. *St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics*. 2018;11(2):151-164. doi: 10.18721/JPM.11214

20. Zhukauskas A.A. Konvektivnyi perenos v teploobmennikakh. M.: Nauka, 1982. 472 s.

Authors of the publication

Guzel R. Badretdinova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Ildar. R. Kalimullin – Kazan Federal University, Kazan, Russia.

Vadim E. Zinurov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Andrey V. Dmitriev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности:

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **09.03.2023г.**

Отредактировано **23.03.2023г.**

Принято **30.03.2023г.**



ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОМ ДИФFUЗОРЕ ПРИ ПОДАЧЕ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ РАЗНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ ТРУБОК

Плотников Л.В., Рыжков А.Ф., Медведев В.А., Смирных М.Д., Осипов Л.Е.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, leonplot@mail.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Вертикальные конические диффузоры применяются в различных технических приложениях: теплообменные аппараты, газоочистные агрегаты, котлы, промышленные печи, сушильные установки, вентиляционные устройства, системы форсунок и другие. Для их эффективной эксплуатации необходимо обеспечивать равномерный подвод рабочей среды в устройство, что определяется особенностями течения в диффузоре. Таким образом, изучение аэродинамики технологических устройств с коническими диффузорами является актуальной задачей для газодинамического совершенствования и поиска способов управления характеристиками потоков. **ЦЕЛЬ.** На основе экспериментальных данных о мгновенных значениях скорости потока воздуха установить эволюцию поля скоростей по высоте цилиндрической части диффузора для разных конфигураций подающих трубок, а также определить величину изменения интенсивности турбулентности по высоте диффузора при разных начальных условиях. **МЕТОДЫ.** Измерение мгновенных значений скорости потока воздуха осуществляется с помощью термоанемометра постоянной температуры. В статье получены данные о полях скоростей и интенсивности турбулентности по высоте и вдоль диаметра цилиндрической части диффузора при подаче воздуха через трубки разных конфигураций. Использовались подающие трубки с поперечными сечениями в форме круга, квадрата и равностороннего треугольника. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье дано подробное описание экспериментального стенда (включая ключевые геометрические размеры), приборно-измерительной системы и методики обработки данных. Представлены диапазоны изменения начальных условий для проведения опытов. Производится сравнение аэромеханических характеристик потоков в вертикальном диффузоре при подаче воздуха через разные конфигурации трубок. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Показано, что в диффузоре имеет место падение средней скорости вверх по течению, что характерно для всех конфигураций подающих трубок. Установлено, что профилированные трубки оказывают влияние на форму поля скоростей. Выявлено, что значения интенсивности турбулентности изменяются от 0,05 до 0,39 (наибольшие значения характерны при подаче воздуха через профилированные трубки). Показано, что интенсивность турбулентности имеет максимальные значения на высоте 300-350 мм, что характерно для всех исследуемых конфигураций трубок.

Ключевые слова: вертикальный конический диффузор; аэродинамика; стационарный поток; профилированные трубки; поле скоростей; интенсивность турбулентности; эмпирические закономерности.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Для цитирования: Плотников Л.В., Рыжков А.Ф., Медведев В.А., Смирных М.Д., Осипов Л.Е. Физическое моделирование аэродинамических характеристик потока в вертикальном диффузоре при подаче воздуха через разные конфигурации трубок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 187-200. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-187-200.

PHYSICAL SIMULATION OF AERODYNAMIC FLOW CHARACTERISTICS IN A VERTICAL DIFFUSER WITH AIR SUPPLY THROUGH DIFFERENT PIPE CONFIGURATIONS

LV. Plotnikov, AF. Ryzhkov, VA. Medvedev, MD. Smirnykh, LE. Osipov
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, leonplot@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Vertical cone diffusers are used in various technical applications: heat exchangers, gas cleaning units, boilers, industrial furnaces, dryers, ventilation devices, nozzle systems and others. For their efficient operation, it is necessary to ensure a uniform supply of the working medium to the device, which is determined by the characteristics of the flow in the diffuser. Thus, the study of the aerodynamics of technological devices with conical diffusers is an urgent task for gas-dynamic improvement and the search for ways to control flow characteristics. *THE PURPOSE.* To establish the evolution of the velocity field along the height of the cylindrical part of the diffuser for different configurations of the supply tubes, and also to determine the magnitude of the change in the intensity of turbulence along the height of the diffuser under different initial conditions based on experimental data on the instantaneous values of the air flow velocity. *METHODS.* Measurement of instantaneous values of air flow velocity is carried out using a constant temperature hot-wire anemometer. The article provides data on velocity fields and turbulence intensity along the height and along the diameter of the cylindrical part of the diffuser when air is supplied through tubes of different configurations. Feed tubes with cross sections in the form of a circle, a square and an equilateral triangle were used. *RESULTS.* The article provides a detailed description of the experimental stand (including key geometric dimensions), instrumentation and measurement system, and data processing techniques. The ranges of changes in the initial conditions for the experiments are presented. A comparison of the aeromechanical characteristics of flows in a vertical diffuser when air is supplied through different tube configurations is carried out. *CONCLUSION.* It is shown that in the diffuser there is a drop in the average velocity upstream, which is typical for all configurations of the supply tubes. It has been established that profiled tubes influence the shape of the velocity field. It was found that the values of turbulence intensity vary from 0.05 to 0.39 (the highest values were typical when air was supplied through profiled tubes). It is shown that the intensity of turbulence has its maximum values at a height of 300-350 mm, which is typical for all investigated tube configurations.

Keywords: vertical cone diffuser; aerodynamics; stationary flow; profiled tubes; velocity field; turbulence intensity; empirical regularities.

Acknowledgments: The research funding from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Ural Federal University Program of Development within the Priority-2030 Program) is gratefully acknowledged.

For citation: LV. Plotnikov, AF. Ryzhkov, VA. Medvedev, MD. Smirnykh, LE. Osipov. Physical simulation of aerodynamic flow characteristics in a vertical diffuser with air supply through different pipe configurations. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(2): 187-200. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-187-200.

Введение (Introduction)

Почти во всех отраслях техники применяют устройства, основной технологический процесс в которых связан с перемещением жидкости или газа. Примерами такого оборудования могут служить теплообменные аппараты, газоочистные агрегаты, котлы, различное химическое оборудование, промышленные печи), сушильные установки различных типов, вентиляционные устройства, системы форсунок и другие. Практически все эти устройства имеют рабочую камеру или подводящие каналы с коническим диффузором [1]. Эксплуатация описанных выше устройств показала, что их расчетная эффективность достигается не всегда [2]. Во многих случаях это обусловлено неравномерным подводом рабочей среды к рабочей зоне устройства, а соответственно, физическими особенностями течения в диффузоре и соответствующими

газодинамическими потерями [3, 4]. Все это свидетельствует о важности изучения аэродинамики технологических устройств с коническими диффузорами с точки зрения газодинамического совершенствования и поиска способов управления характеристиками потоков. Более того, необходимо получение достоверных экспериментальных данных об особенностях газодинамики потоков и их математическое описание для совершенствования инженерных методик расчета конических диффузоров и уточнения математических моделей [5, 6].

Краткий обзор классических (фундаментальных) исследований и современных данных об аэродинамических характеристиках в коническом диффузоре представлен ниже.

Существуют базовые исследования о газодинамике течений в конических диффузорах для разных конструкций и при различных начальных уровнях интенсивности турбулентности. Например, Klein A. Провел опыты и сделан анализ экспериментальных данных о влиянии условий на входе на характеристики конических диффузоров [7]. В частности, в статье описаны эффекты блокировки толщины входного пограничного слоя при разных формах входа потока, интенсивности турбулентности и числах Рейнольдса. Jeyachandran K. and Ganesan V. исследовали влияние различных газодинамических условий на входе в диффузор с помощью физико-математического моделирования [8]. В работе представлен анализ данных о профилях скорости, мощности импульса, коэффициенте формы, производительности и эффективности исследуемых диффузоров. Okwuobi P.A.C. and Azad R.S. экспериментально изучали структуру потока и характеристики турбулентности в коническом диффузоре при полностью развитом потоке на входе [9]. В итоге, установлены базовые физические закономерности и сформулированы рекомендации по проектированию конических диффузоров [7-9].

Следует отметить, что существуют современные исследования газодинамических характеристик потоков газа в различных конфигурациях диффузоров, которые нацелены на уточнение методик расчета, дополнение базы знаний о физических механизмах и создание оригинальных математических моделей [10-13]. Так, Ferrari A. предложил аналитические зависимости, которые дополняют модели Fanno, относящиеся к вязкому адиабатическому течению в трубе постоянного сечения и невязкому адиабатическому течению в коническом диффузоре [10]. Эти новые зависимости расширяют набор точных решений газовой динамики и позволят повысить качество математических моделей. Lee J. и соавторы исследовали характеристики турбулентности и когерентных структур в потоке газа через конический диффузор с разными углами раскрытия (2° , 4° и 8°) на основе численного моделирования [11]. Полученные данные позволили уточнить физические особенности газодинамики стационарных течений в диффузорах. Wu X. и др. обнаружили внутренний слой в потоке газа через ассиметричный плоский диффузор на основе физико-математического моделирования [12]. Исследования позволяют улучшить методики инженерных расчетов диффузоров. De Souza F.J. и соавторы исследовали газодинамику потока воздуха с различными частицами в вертикальном коническом диффузоре с помощью численного моделирования [13]. Было выявлено, что даже небольшое количество частиц существенно влияют на форму потока в диффузоре и поток может снова прилипнуть к стенке при некоторых условиях.

Следует отметить, что существует большое количество прикладных исследований по использованию диффузоров в различных технических устройствах. Например, диффузоры активно применяются в органическом цикле Ренкина [14-18]. В этом цикле ключевым устройством является турбодетандер, который оснащен диффузором на выходе для увеличения восстановления давления и улучшения КПД турбины. Так, Zou A. и др. осуществляли оптимизацию конструкции диффузора для конкретной турбины на основе численного моделирования [14]. Dong B. с соавторами проводили оценку влияния параметров газа на входе в диффузор на его газодинамические характеристики (в частности, коэффициент скорости) с помощью математического моделирования [15]. From C.S. и др. изучали влияние интенсивности турбулентности потока на входе в диффузор на газодинамику и ее влияние на показатели конкретной турбины [17]. Кеер J.A. с соавторами исследовали геометрию комбинированного (кольцевого-радиального) диффузора на газодинамические характеристики потоков и эффективность турбины в органическом цикле Ренкина [18].

Диффузорные каналы активно применяются и изучаются во многих других технических приложениях. Можно выделить некоторые из них. Например, остается актуальной задача по оптимизации формы и параметров потоков в диффузоре для камеры смешения в эжекторах [19, 20], доводка сверхзвуковых диффузоров [21], оценка параметров в диффузорах для авиационных газотурбинных двигателей [22], внедрение и расчет диффузора в реактор для окисления аммиака [23], моделирование и совершенствование аэродинамики диффузоров в трубчатом реакторе [24] и промышленной печи [25].

Таким образом, на основе анализа литературных данных других авторов можно сделать следующие выводы:

- газодинамическое совершенствование и разработка способов управления газодинамикой потоков в коническом диффузоре остается актуальной задачей для фундаментальной и прикладной науки;
- современные исследования газодинамических характеристик потоков в конических диффузорах осуществляются в основном посредством численного моделирования;
- существует недостаток достоверных экспериментальных данных о газодинамических характеристиках потоков в вертикальном коническом диффузоре для верификации математических моделей.

Соответственно, основные задачи данного исследования состояли в следующем:

- получить экспериментальные данные о мгновенных значениях скорости потока воздуха по высоте и по диаметру цилиндрической части диффузора для разных начальных условий;
- установить эволюцию полей скоростей по высоте цилиндрической части диффузора для разных конфигураций подающих трубок;
- экспериментально определить величину падения средней скорости и изменение интенсивности турбулентности по высоте диффузора при разных начальных условиях.

Материалы и методы (Materials and methods)

Аэродинамика стационарных потоков в вертикальном диффузоре исследовалось на лабораторной установке, основные элементы которой показаны на рисунке 1. Конический диффузор состоял из трех основных элементов: (1) основание с диаметром 50 мм, в которое устанавливались четыре подающие трубки под углом 45°; (2) конический участок с соотношением 1:2 (50 мм на 100 мм); (3) цилиндрический участок с диаметром 100 мм и высотой 1000 мм. По высоте диффузора было 4 контрольных сечения на высоте 100 мм, 300 мм, 500 мм и 800 мм. В каждом контрольном сечении проводились измерения мгновенных значений скорости потока воздуха вдоль диаметра цилиндрической части на расстояниях 10 мм (у стенки), 20 мм, 30 мм, 40 мм и 50 мм (в центре диффузора).

Рабочей средой в опытах является воздух с температурой $t = 20-22$ °С и барометрическим давлением $p_o = 0,1013$ МПа. Характерное сечение в данной работе было принято на высоте 100 мм и центре цилиндрической части диффузора (на расстоянии 50 мм). В ходе проведения экспериментов средняя скорость потока воздуха в характерном сечении изменялась от 4 м/с до 8 м/с ($26500 < Re < 53500$). Соответственно, режим течения в данном исследовании являлся развитым турбулентным.

Автоматизированная система измерений состояла из следующих основных элементов: термоанемометр с датчиками, аналого-цифровой преобразователь и ноутбук с программным обеспечением. Измерения мгновенных значений скорости потока воздуха w_x производились с помощью термоанемометра постоянной температуры. В качестве чувствительного элемента датчика термоанемометра использовалась нихромовая нить диаметром 5 мкм и длиной 4 мм. Было изготовлено 5 датчиков с расположением нити на расстояниях 10, 20, 30, 40 и 50 мм. Данные с термоанемометра (выходной сигнал от 0 до 5 В) поступали в аналого-цифровой преобразователь, а далее они передавались в ноутбук для обработки на специализированном программном обеспечении. Стандартная относительная неопределенность измерения скорости потока воздуха составляла 3,6 %. Измерительная система и особенности ее функционирования несколько подробнее описаны в [26, 27].

Средняя скорость потока w в измерительной точке определялась как математическое ожидание функции $w_x = f(\tau)$. Одной из ключевых аэродинамических характеристик потоков в диффузорах является интенсивность турбулентности Tu . В данном исследовании Tu

рассчитывалась как отношение среднеквадратичной пульсационной составляющей скорости к средней скорости исследуемого потока [27].

Известно, что форма поперечного сечения трубопроводов оказывает существенное влияние на структуру потока в них [2, 28, 29]. Поэтому в данном исследовании воздух поступал в вертикальный диффузор через подающие трубки, имеющие разные формы поперечного сечения (рис. 2).

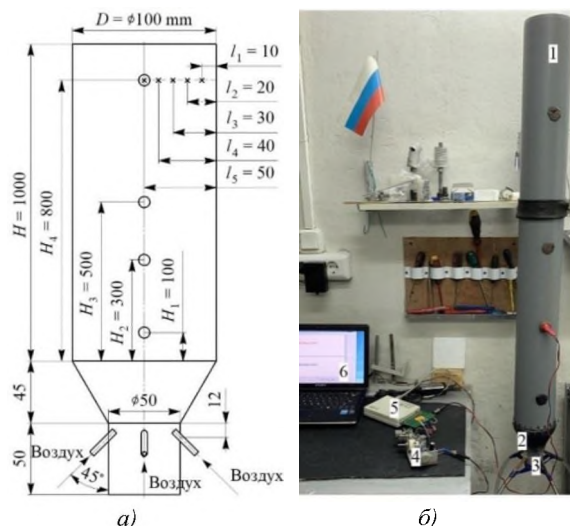


Рис. 1. Геометрические размеры (а) и фотография (б) экспериментальной установки для исследования аэродинамических характеристик потоков в вертикальном диффузоре: 1 – цилиндрическая часть установки; 2 – диффузор; 3 – основание с подающими трубками; 4 – термоанемометр для измерения мгновенных значений скорости потока; 5 – аналого-цифровой преобразователь; 6 – ноутбук для сбора и обработки экспериментальных данных

Fig. 1. Geometric dimensions (a) and photograph (b) of the experimental apparatus for the investigation of aerodynamic characteristics of streams in the vertical diffuser: 1 - cylindrical part of the installation; 2 - diffuser; 3 - base with feeding tubes; 4 - Thermoanemometer to measure instantaneous flow rates; 5 - analog-digital converter; 6 - notebook to collect and process experimental data

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

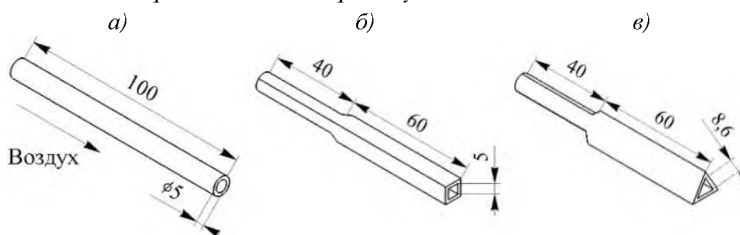


Рис. 2. Общий вид и основные размеры трубок для подачи воздуха в вертикальный диффузор: а – трубка с круглым поперечным сечением; б – трубка с участком с квадратным поперечным сечением; в – трубка с участком с треугольным поперечным сечением

Fig. 2. General appearance and main dimensions of tubes for air supply to vertical diffuser: a - round cross-section tube; b - square cross-section tube; c - triangular section tube

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Геометрические размеры поперечных сечений подающих трубок определялись исходя из равенства эквивалентных гидравлических диаметров. Соответственно, круглые трубки имели диаметр $d = 5$ мм, сторона квадратных трубок равнялась также 5 мм, а сторона трубок с треугольным поперечным сечением – 8.6 мм.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

На рисунке 3 показаны первичные данные в виде функции $w_x = f(\tau)$ для датчика в первом сечении ($H_1 = 100$ мм) в центре цилиндрической части диффузора ($l_5 = 50$ мм) при подаче воздуха через разные конфигурации трубок. Следует отметить, что данные подобраны так, что средняя скорость в первом сечении является примерно одинаковой для всех представленных данных и составляет около 4.5 м/с.

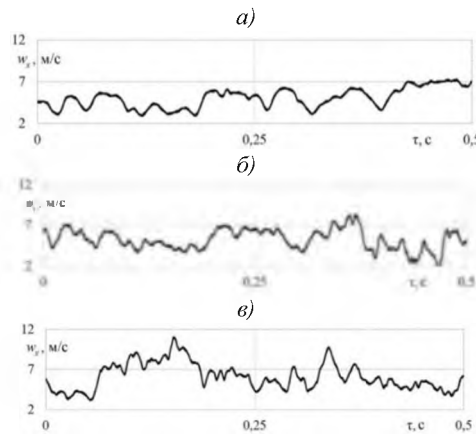


Рис. 3. Зависимости местных значений скорости потока воздуха w_x от времени τ в первом контрольном сечении ($H_1 = 100$ мм) для датчика в центре установки ($l_5 = 50$ мм) для разных конфигураций подающих трубок: а – круглая трубка (параметры в сечении: $w_1 = 4,2$ м/с, $Tu = 0,231$); б – квадратная трубка ($w_1 = 4,45$ м/с, $Tu = 0,18$); в – треугольная трубка ($w_1 = 4,48$ м/с, $Tu = 0,285$)

Fig. 3. Dependence of local air flow rates w_x on the time τ in the first reference section ($H_1 = 100$ mm) for the sensor in the centre of the installation ($l_5 = 50$ mm) for different feed tube configurations: а - round tube (parameters in the cross section: $w_1 = 4.2$ m/s, $Tu = 0.231$); б - square tube ($w_1 = 4.45$ m/s, $tu = 0.18$); в - triangular tube ($w_1 = 4.48$ m/s, $tu = 0.285$)

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Из рисунка 3 видно, что функция $w_x = f(\tau)$ является белым шумом для всех конфигураций подающих трубок. При этом, визуальные наблюдения показывают, что использование профилированных трубок приводит к формированию небольших флуктуаций в функцию $w_x = f(\tau)$. Это также подтверждается расчетными данными: Tu для круглых трубок составляет 0.231, а Tu равняется 0.285 для треугольных трубок (отличия почти 20 %). Это объясняется тем, что в углах профилированных трубок создаются устойчивые, вихревые структуры, которые турбулизируют течение в диффузоре. Аналогичные газодинамические эффекты были обнаружены в работах [28, 29]. Также следует отметить, что представленные зависимости нецелесообразно описывать математически, поскольку эти данные являются частными случаями.

На рисунке 4 показаны также первичные данные в виде функции $w_x = f(\tau)$, но уже для датчика в третьем сечении ($H_3 = 300$ мм) в центре цилиндрической части диффузора ($l_5 = 50$ мм) при подаче воздуха через разные конфигурации трубок.

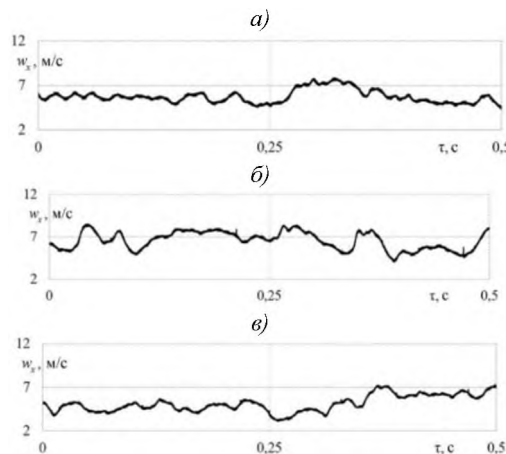


Рис. 4. Зависимости местных значений скорости потока воздуха w_x от времени τ в третьем контрольном сечении ($H_3 = 500$ мм) для датчика в центре установки ($l_5 = 50$ мм) для разных конфигураций подающих трубок: а – круглая трубка (параметры в сечении: $w_3 = 4,81$ м/с, $Tu = 0,124$); б – квадратная трубка ($w_3 = 4,85$ м/с, $Tu = 0,313$); в – треугольная трубка ($w_3 = 4,79$ м/с, $Tu = 0,199$)

Fig 4. Dependence of local air flow rate w_x on the time τ in the third reference section ($H_3 = 500$ mm) for the sensor in the centre of the installation ($l_5 = 50$ mm) for different feed tube configurations: а - round tube (parameters in the cross section: $w_3 = 4.81$ m/s, $Tu = 0.124$); б - square tube ($w_3 = 4.85$ m/s, $tu = 0.313$); в - triangular tube ($w_3 = 4.79$ m/s, $tu = 0.199$)

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

На основе сравнения функций $w_x = f(\tau)$ на рис. 3 и 4 установлено, что наблюдается существенное снижение небольших флуктуаций скорости вверх по потоку. Это свидетельствует о постепенной релаксации потока по высоте цилиндрической части диффузора.

Далее осуществлялось осреднение данных в каждом контрольном сечении по высоте и по диаметру диффузора. В результате были получены поля скоростей в цилиндрической части диффузора при подаче воздуха через трубки с разными поперечными сечениями (рис. 5-7).

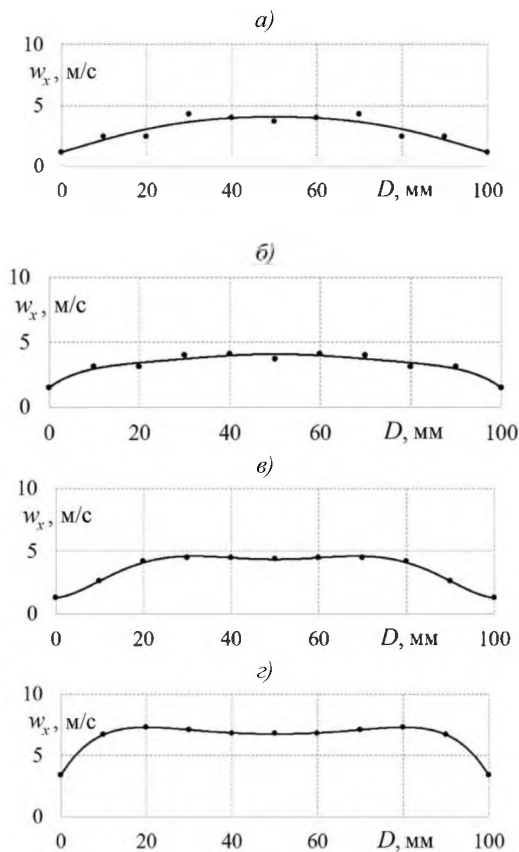


Рис. 5. Изменение местных значений скорости потока w_x вдоль диаметра цилиндра D при подаче воздуха в диффузор через круглые трубки для начальной средней скорости потока в первом сечении $w_1 \approx 6,31$ м/с по высоте установки: а – $H_4 = 800$ мм; б – $H_3 = 500$ мм; в – $H_2 = 300$ мм; г – $H_1 = 100$ мм

Fig. 5. Change of local flow rates w_x along cylinder diameter D when air is fed into the diffuser through round tubes for initial mean flow rate in the first section $w_1 \approx 6.31$ m/s in mounting height: а - $H_4 = 800$ mm; б - $H_3 = 500$ mm; в - $H_2 = 300$ mm; г - $H_1 = 100$ mm

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Из рисунка 5 видно, что имеет место снижение средней скорости потока по высоте цилиндрической части диффузора (подача воздуха через круглые трубки). Также наблюдается изменение формы поля скоростей вверх по потоку. Аналогичные результаты были получены в случае подачи воздуха через профилированные трубки (рис. 6 и 7). Также существует падение скорости по высоте диффузора. Следует отметить, что поля скоростей при подаче воздуха через треугольные трубки несколько отличается от других конфигураций. Это может быть следствием влияния вихревых структур, которые образуются в углах треугольных трубок.

Следует отметить, что обнаруженные газодинамические эффекты сохраняются для всех исследуемых начальных скоростей подачи воздуха и для всех конфигураций подающих трубок. Соответственно, можно предположить, что существует необходимость в математическом описании интегральных аэродинамических характеристик потоков для исследуемых конфигураций вертикального конического диффузора. Эти данные позволят уточнить математические модели и алгоритмы инженерных расчетов диффузоров для различных технических устройств.

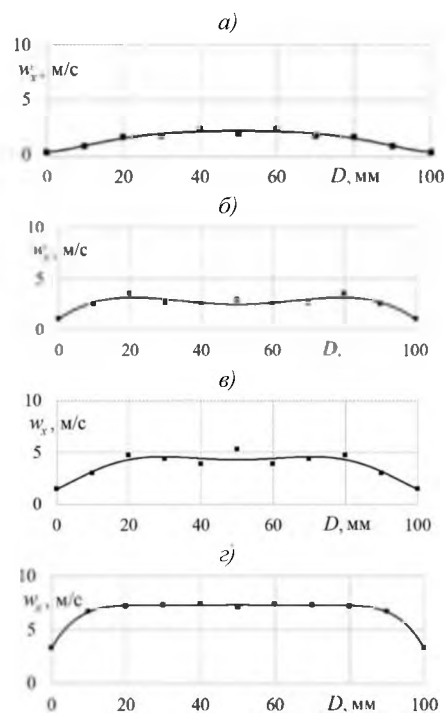


Рис. 6. Изменение местных значений скорости потока w_x вдоль диаметра цилиндра D при подаче воздуха в диффузор через квадратные трубки для начальной скорости потока в первом сечении $w_1 \approx 6,45$ м/с по высоте установки: а – $H_4 = 800$ мм; б – $H_3 = 500$ мм; в – $H_2 = 300$ мм; г – $H_1 = 100$ мм

Fig. 6. Change of local flow rate w_x along cylinder diameter D when air is fed into the diffuser through square tubes for initial flow rate in the first section $w_1 \approx 6.45$ m/s in mounting height: а – $H_4 = 800$ mm; б – $H_3 = 500$ mm; в – $H_2 = 300$ mm; г – $H_1 = 100$ mm

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

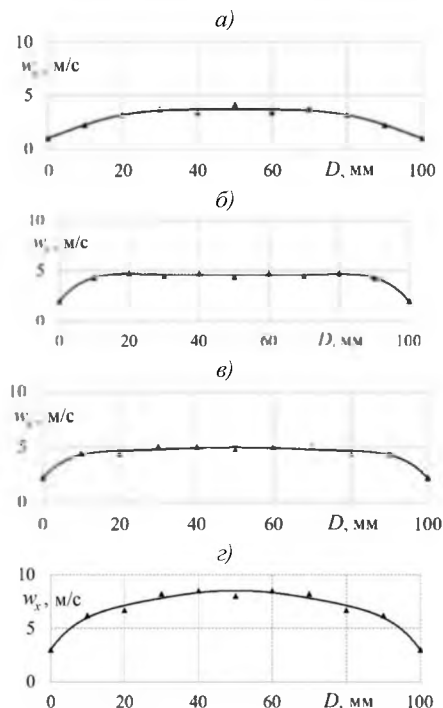


Рис. 7. Изменение местных значений скорости потока w_x вдоль диаметра цилиндра D при подаче воздуха в диффузор через треугольные трубки для начальной скорости потока в первом сечении $w_1 \approx 6,65$ м/с по высоте установки: а – $H_4 = 800$ мм; б – $H_3 = 500$ мм; в – $H_2 = 300$ мм; г – $H_1 = 100$ мм

Fig. 7. Change of local flow rates w_x along cylinder diameter D when air is fed into the diffuser through triangular tubes for initial flow rate in the first section $w_1 \approx 6.65$ m/s in mounting height: а – $H_4 = 800$ mm; б – $H_3 = 500$ mm; в – $H_2 = 300$ mm; г – $H_1 = 100$ mm

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

На рисунке 8 показаны примеры изменения интенсивности турбулентности Tu вдоль диаметра цилиндрической части диффузора в первом сечении при подаче воздуха через трубки разных конфигураций.

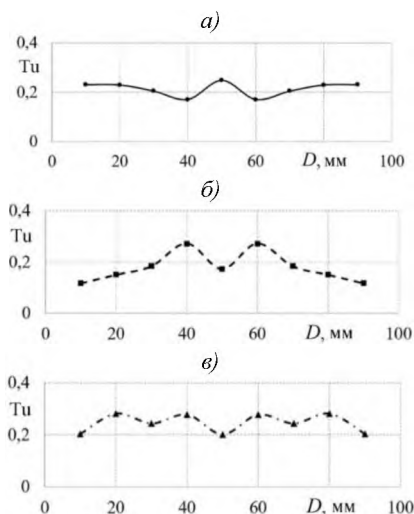


Рис. 8. Изменение интенсивности турбулентности Tu (в первом сечении $H1 = 100$ мм) вдоль диаметра цилиндра D при подаче воздуха в диффузор через трубки разных конфигураций: а – круглая трубка ($w1 \approx 6,65$ м/с, $Tu1 = 0,213$); б – квадратная трубка ($w1 \approx 6,45$ м/с, $Tu1 = 0,180$); в – треугольная трубка ($w1 \approx 6,65$ м/с, $Tu1 = 0,245$)

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Из рисунка 8 и всего массива полученных данных можно сделать следующие выводы:

- не обнаружено четких закономерностей в изменении Tu вдоль диаметра цилиндрической части диффузора;
- влияние формы поперечного сечения трубок на вид функции $Tu = f(D)$ также не установлено (по мнению автора, изменения носят случайный характер);
- амплитуда колебаний значений интенсивности турбулентности относительно среднего значения составляет $\pm 35\%$;
- математическое описание функций $Tu = f(D)$ для исследуемых случаев является нецелесообразным до установления физических закономерностей.

На рисунке 9 показаны закономерности падения средней скорости в контрольном сечении по высоте цилиндрической части диффузора при подаче воздуха через трубки с разными поперечными сечениями для разных начальных скоростей потока.

Установлено, что закономерности снижения скорости вверх по потоку с достаточной точностью описываются экспоненциальной зависимостью $w = a \cdot e^{-b \cdot H}$. При этом, форма поперечного сечения трубок фактически не оказывает влияние на интенсивность падения скорости потока воздуха по высоте установки.

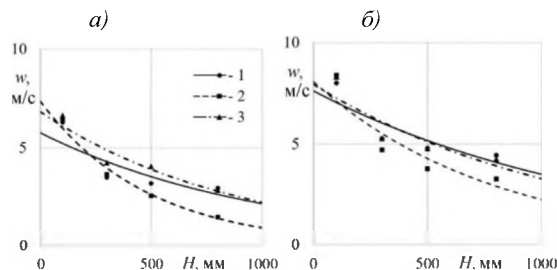


Рис. 9. Зависимости средней скорости потока воздуха w по высоте установки H при подаче воздуха через круглые (1), квадратные (2) и треугольные (3) трубки для начальной средней скорости потока в первом сечении: а – $w1 \approx 6,5$ м/с; б – $w1 \approx 8,25$ м/с

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

На рисунке 10 представлены зависимости изменения интенсивности турбулентности Tu от величины средней скорости потока воздуха w в контрольных сечениях на расстоянии 100 мм и 800 мм.

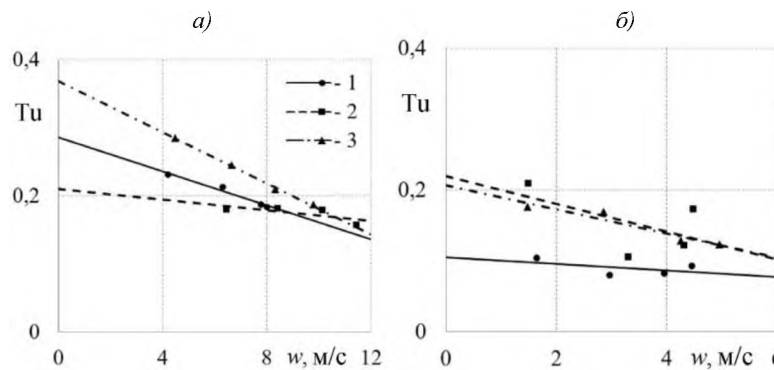


Рис. 10. Зависимости интенсивности турбулентности Tu от средней скорости потока воздуха w при подаче воздуха через круглые (1), квадратные (2) и треугольные (3) трубки для разных контрольных сечений: а – контрольное сечение на высоте $H1 = 100$ мм; б – $H4 = 800$ мм

Fig. 10. Dependence of turbulence intensity Tu on mean air flow rate w for round (1), square (2) and triangular (3) tubes for different test sections: а – test section at height $H1 = 100$ mm; б – $H4 = 800$ mm

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Установлено, что имеет место снижение Tu с ростом начальной скорости потока воздуха и это падение Tu хорошо описывается линейными уравнениями. При этом, интенсивность турбулентности имеет более высокие значения при подаче воздуха через профилированные трубки по сравнению с круглыми подающими трубками. Это также объясняется турбулизацией течения из-за вихревых структур, характерных для профилированных каналов.

Полученные экспериментальные данные и предложенные уравнения описание можно использовать для верификации математических моделей для моделирования аэродинамических процессов в вертикальном коническом диффузоре.

На рис. 11 показаны экспериментальные зависимости интенсивности турбулентности от высоты цилиндрической части диффузора для разных начальных скоростей потока при подаче воздуха через трубки с разными поперечными сечениями.

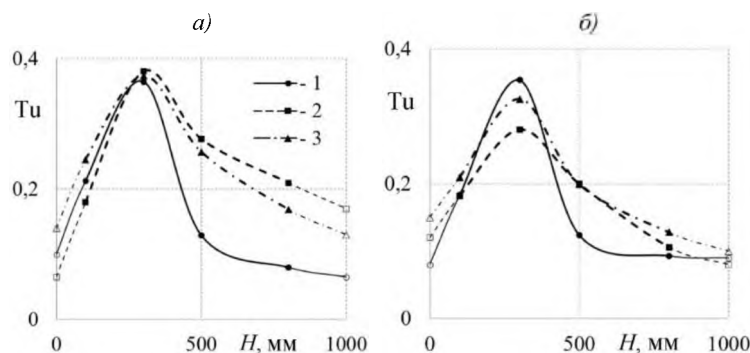


Рис. 11. Зависимости интенсивности турбулентности Tu по высоте диффузора H при подаче воздуха через круглые (1), квадратные (2) и треугольные (3) трубки для начальной средней скорости потока в первом сечении: а – $w_1 \approx 6,5$ м/с; б – $w_1 \approx 8,25$ м/с

Fig. 11. Turbulence intensity dependencies Tu for diffuser height H for round (1), square (2) and triangular (3) tubes for initial average flow rate in the first section: а – $w_1 6.5$ m/s; б – $w_1 8.25$ m/s

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

На основе анализа функций $Tu = f(H)$ можно сделать следующие выводы:

– форма поперечного сечения трубок оказывает существенное влияние на величину интенсивности турбулентности по высоте цилиндрической части вертикального диффузора;

– зависимость $Tu = f(H)$ имеет ярко выраженный максимум в районе $H = 300$ мм, что характерно для всех начальных средних скоростей потока и всех конфигураций подающих трубок;

– интенсивность турбулентности имеет существенно более высокие значения (вплоть до 50 %) при подаче воздуха через профилированные трубки по сравнению с круглыми трубками, что особенно характерно для низких начальных w .

Таким образом, можно констатировать, что аэродинамические характеристики потоков в вертикальном коническом диффузоре могут быть аппроксимированы относительно простыми математическими выражениями, которые удобно использовать в инженерных расчетах.

Выводы

На основе проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Получены экспериментальные данные о мгновенных значениях скорости стационарного потока по высоте и вдоль диаметра цилиндрической части диффузора для разных начальных условий и при подаче воздуха через трубки разных конфигураций. Данные получены для диапазона начальных скоростей от 1 м/с до 12 м/с.

2. Определены поля скоростей по высоте цилиндрической части диффузора для разных начальных условий при подаче воздуха через трубки с поперечными сечениями в форме круга, квадрата и треугольника. Показана эволюция полей скоростей вверх по потоку:

– имеет место падение средней скорости вверх по течению, что характерно для всех конфигураций подающих трубок;

– показано, что подача воздуха через профилированные трубки оказывает влияние на форму поля скоростей, что особенно характерно при подаче воздуха через треугольные трубки.

3. Рассчитана интенсивность турбулентности Tu потока по высоте и вдоль диаметра диффузора для разных начальных условий и при подаче воздуха через трубки с разными конфигурациями:

– установлено, что значения Tu изменяются от 0,05 до 0,39 для исследуемых режимов течения и геометрических размеров установки;

– выявлено, что более высокие значения Tu характерны для подачи воздуха через профилированные трубки (отличия могут достигать 50 %).

4. Установлены закономерности изменения интенсивности турбулентности по высоте диффузора для разных начальных условий и конфигураций подающих трубок:

– показано, что подача воздуха через трубки разных конфигураций оказывает существенное влияние на уровень интенсивности турбулентности (изменения на величину ± 30 %);

– показано, что Tu имеет максимальные значения на высоте 300-350 мм, что характерно для всех исследуемых конфигураций трубок.

5. Полученные данные об аэродинамических характеристиках потоков в коническом диффузоре могут быть полезными для уточнения и верификации математических моделей, а также для совершенствования инженерных расчетов.

Направление дальнейших исследований заключается в математическом представлении и получении безразмерных уравнений для описания аэродинамических характеристик потоков в вертикальном диффузоре разных конструкций, а также в уточнении численных моделей для моделирования аэродинамики.

Литература

1. Japikse D., Baines N.C. Diffuser Design Technology. Norwich, VT: Concepts ETI, 1998. 524 p.
2. Идельчик И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов). Москва: Машиностроение, 1983. 351 с.
3. Emmons H.W. Fundamentals of gas dynamics. New Jersey: Princeton University Press, 2015. 783 p.
4. Hirsch C. Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. UK: Charles Hirsch, 2007. 696 p.
5. Yavuz M., Sene N. Approximate solutions of the model describing fluid flow using generalized p-laplace transform method and heat balance integral method // Axioms. 2020. V. 9(4)-123. P. 1-18.
6. Xiao Y., Yue F., Wang X., Zhang X. Reliability-Based Design Optimization of Structures Considering Uncertainties of Earthquakes Based on Efficient Gaussian Process Regression Metamodeling // Axioms. 2022. V. 11(2). Article number 81.

7. Klein A. Effects of inlet conditions on conical-diffuser performance // *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*. 1981. Vol. 103 (2). P. 250-257.
8. Jeyachandran K., Ganesan V. Numerical modelling of turbulent flow through conical diffusers with uniform and wake velocity profiles at the inlet // *Mathematical and Computer Modelling*. 1988. V. 10(2). P. 87-97.
9. Okwuobi P.A.C., Azad R.S. Turbulence in a conical diffuser with fully developed flow at entry // *Journal of Fluid Mechanics*. 1973. V. 57(3). P. 603-622.
10. Ferrari A. Exact solutions for quasi-one-dimensional compressible viscous flows in conical nozzles // *Journal of Fluid Mechanics*. 2021. V. 915. Article number 915A1-1.
11. Lee J., Jang S.J., Sung H.J. Direct numerical simulations of turbulent flow in a conical diffuser // *Journal of Turbulence*. 2012. V. 13. P. 1-29.
12. Wu X., Schlüter J., Moin P., Pitsch H., Iaccarino G., Ham F. Computational study on the internal layer in a diffuser // *Journal of Fluid Mechanics*. 2006. V. 550. P. 391-412.
13. De Souza F.J., Silva A.L., Utzig J. Four-way coupled simulations of the gas-particle flow in a diffuser // *Powder Technology*. 2014. V. 253. P. 496-508.
14. Zou A., Chassaing J.-C., Li W., Gu Y., Sauret E. Quantified dense gas conical diffuser performance under uncertainties by flow characteristic analysis // *Applied Thermal Engineering*. 2019. V. 161. Article number 114158.
15. Dong B., Xu G., Li T., Quan Y., Zhai L., Wen J. Numerical prediction of velocity coefficient for a radial-inflow turbine stator using R123 as working fluid // *Applied Thermal Engineering*. 2018. V. 130. P. 1256-1265.
16. Kim D.-Y., Kim Y.-T. Preliminary design and performance analysis of a radial inflow turbine for organic Rankine cycles // *Applied Thermal Engineering*. 2017. V. 120. P. 549-559.
17. From C.S., Sauret E., Armfield S.W., Saha S.C., Gu Y.T. Turbulent dense gas flow characteristics in swirling conical diffuser // *Computers and Fluids*. 2017. V. 149. P. 100-118.
18. Keep J.A., Head A.J., Jahn I.H. Design of an efficient space constrained diffuser for supercritical CO₂ turbines // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. V. 821(1). Article number 012026.
19. Wang W.-B., Zheng L.-X., Lu W., et al. Study on Structural Design Optimization of Ejector Expansion Chamber // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2021. V. 42(2). P. 309-313.
20. Sierra-Pallares J., García del Valle J., Paniagua J.M., García J., Méndez-Bueno C., Castro F. Shape optimization of a long-tapered R134a ejector mixing chamber // *Energy*. 2018. V. 165(A). P. 422-438.
21. Maicke B.A., Bondarev G. Quasi-one-dimensional modeling of pressure effects in supersonic nozzles // *Aerospace Science and Technology*. 2017. V. 70. P. 161-169.
22. Vinod L., Mahendra M.A., Mahantayya K.H. The cfd analysis of subsonic flow around struts of airfoil and cylindrical shape attached to a conical diffuser at exhaust of a gas turbine engine // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2019. V. 9(4). P. 943-954.
23. Moszowski B., Wajman T., Sobczak K., Inger M., Wilk M. The analysis of distribution of the reaction mixture in ammonia oxidation reactor // *Polish Journal of Chemical Technology*. 2019. V. 21(1). P. 9-12.
24. Huang Y., Coggon M.M., Zhao R., Lignell H., Bauer M.U., Flagan R.C., Seinfeld J.H. The Caltech Photooxidation Flow Tube reactor: Design, fluid dynamics and characterization // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2017. V. 10(3). P. 839-867.
25. Keshavarz E., Toghraie D., Haratian M. Modeling industrial scale reaction furnace using computational fluid dynamics: A case study in Ilam gas treating plant // *Applied Thermal Engineering*. 2017. V. 123. P. 277-289.
26. Plotnikov L., Plotnikov I., Osipov L., Slednev V., Shurupov V. An Indirect Method for Determining the Local Heat Transfer Coefficient of Gas Flows in Pipelines // *Sensors*. 2022. V. 22 (17). Article number 6395.
27. Plotnikov L.V. Thermal-mechanical characteristics of stationary and pulsating gas flows in a gas-dynamic system (in relation to the exhaust system of an engine) // *Thermal Science*. 2022. V. 26(1A). P. 365-376.
28. Плотников Л.В., Бродов Ю.М., Жилкин Б.П., и др. Физическое и численное моделирование тепломеханических характеристик стационарных потоков в газоздушных трактах поршневых двигателей // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019. Т. 21. № 5. С.22-28.
29. Плотников Л.В., Жилкин Б.П., Бродов Ю.М. Влияние поперечного профилирования впускных и выпускных трубопроводов поршневых двигателей на тепломеханические характеристики потоков // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2017. № 1-2. С. 119-126.

Авторы публикации

Плотников Леонид Валерьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: plotnikovlv@mail.ru

Рыжков Александр Филиппович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: af.ryzhkov@mail.ru

Медведев Валерий Андреевич – бакалавр Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: warhammer_valera@mail.ru

Смирных Михаил Дмитриевич – бакалавр Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: mihail300401@gmail.com

Осипов Леонид Евгеньевич – аспирант кафедры «Турбины и двигатели Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: klumbaa@outlook.com.

References

1. Japikse D, Baines NC. *Diffuser Design Technology*. Norwich, VT: Concepts ETI, 1998. 524 p.
2. Idelchik, IE *Aerohydrodynamics of technological apparatuses (Inlet, outlet and distribution of the flow over the cross section of the devices)*. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 351 p.
3. Emmons HW. *Fundamentals of gas dynamics*. New Jersey: Princeton University Press, 2015. 783p.
4. Hirsch C. *Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*. UK: Charles Hirsch, 2007. 696 p.
5. Yavuz M, Sene N. Approximate solutions of the model describing fluid flow using generalized p-laplace transform method and heat balance integral method. *Axioms*. 2020; 9(4):123:1-18.
6. Xiao Y, Yue F, Wang X, Zhang X. Reliability-Based Design Optimization of Structures Considering Uncertainties of Earthquakes Based on Efficient Gaussian Process Regression Metamodeling. *Axioms*. 2022; 11(2):81.
7. Klein A. Effects of inlet conditions on conical-diffuser performance. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*. 1981;103 (2):250-257.
8. Jeyachandran K., Ganesan V. Numerical modelling of turbulent flow through conical diffusers with uniform and wake velocity profiles at the inlet. *Mathematical and Computer Modelling*. 1988; 10(2):87-97.
9. Okwuobi P.A.C., Azad R.S. Turbulence in a conical diffuser with fully developed flow at entry. *Journal of Fluid Mechanics*. 1973; 57(3):603-622.
10. Ferrari A. Exact solutions for quasi-one-dimensional compressible viscous flows in conical nozzles. *Journal of Fluid Mechanics*. 2021;915:915A1-1.
11. Lee J., Jang S.J., Sung H.J. Direct numerical simulations of turbulent flow in a conical diffuser. *Journal of Turbulence*. 2012;13:1-29.
12. Wu X, Schlüter J, Moin P, et al. Computational study on the internal layer in a diffuser. *Journal of Fluid Mechanics*. 2006; 550:391-412.
13. De Souza F.J., Silva A.L., Utzig J. Four-way coupled simulations of the gas-particle flow in a diffuser. *Powder Technology*. 2014; 253:496-508.
14. Zou A, Chassaing J.-C, Li W, et al. Quantified dense gas conical diffuser performance under uncertainties by flow characteristic analysis. *Applied Thermal Engineering*. 2019; 161:114158.
15. Dong B, Xu G, Li T, et al. Numerical prediction of velocity coefficient for a radial-inflow turbine stator using R123 as working fluid. *Applied Thermal Engineering*. 2018; 130:1256-1265.
16. Kim D-Y, Kim Y-T. Preliminary design and performance analysis of a radial inflow turbine for organic Rankine cycles. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 120:549-559.
17. From CS, Sauret E, Armfield SW, et al. Turbulent dense gas flow characteristics in swirling conical diffuser. *Computers and Fluids*. 2017; 149:100-118.
18. Keep JA, Head AJ, Jahn IH. Design of an efficient space constrained diffuser for supercritical CO2 turbines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017; 821(1):012026.

19. Wang W.-B, Zheng L.-X, Lu W, et al. Study on Structural Design Optimization of Ejector Expansion Chamber. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2021; 42(2):309-313.
20. Sierra-Pallares J, García del Valle J, Paniagua JM, et al. Shape optimization of a long-tapered R134a ejector mixing chamber. *Energy*. 2018; 165(A):422-438.
21. Maicke BA, Bondarev G. Quasi-one-dimensional modeling of pressure effects in supersonic nozzles. *Aerospace Science and Technology*. 2017; 70:161-169.
22. Vinod L, Mahendra MA, Mahantayya KH. The cfd analysis of subsonic flow around struts of airfoil and cylindrical shape attached to a conical diffuser at exhaust of a gas turbine engine. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2019; 9(4):943-954.
23. Moszowski B, Wajman T, Sobczak K, et al. The analysis of distribution of the reaction mixture in ammonia oxidation reactor. *Polish Journal of Chemical Technology*. 2019; 21(1):9-12.
24. Huang Y, Coggon MM, Zhao R, et al. The Caltech Photooxidation Flow Tube reactor: Design, fluid dynamics and characterization. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2017; 10(3):839-867.
25. Keshavarz E, Toghraie D, Haratian M. Modeling industrial scale reaction furnace using computational fluid dynamics: A case study in Ilam gas treating plant. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 123:277-289.
26. Plotnikov L, Plotnikov I, Osipov L, et al. An Indirect Method for Determining the Local Heat Transfer Coefficient of Gas Flows in Pipelines. *Sensors*. 2022; 22 (17):6395.
27. Plotnikov L.V. Thermal-mechanical characteristics of stationary and pulsating gas flows in a gas-dynamic system (in relation to the exhaust system of an engine). *Thermal Science*. 2022; 26(1A):365-376.
28. Plotnikov LV, Brodov YM, Zhilkin BP, et al. Physical and numerical simulation of the thermal and mechanical characteristics of stationary flows in the gas-air paths of piston engines. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(5):22-28.
29. Plotnikov LV, Zhilkin BP, Brodov YM. Influence of transverse profiling of intake and exhaust pipelines of piston engines on the thermal and mechanical characteristics of flows. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017; 1(2):119-126.

Authors of the publication

Leonid V. Plotnikov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Alexander F. Ryzhkov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Valery A. Medvedev – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Mikhail D. Smirnykh – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Leonid E. Osipov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Шифр научной специальности:

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки)

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки)

Получено **21.02.2023г.**

Отредактировано **06.03.2023г.**

Принято **20.03.2023г.**

Сдано в набор 20.04.2023г.
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 100 экз.

Подписано к печати 29.05.2023г.
Усл. печ. л. 21,2
Заказ № 5278
Дата выхода в свет 16.06.2023г.

Формат 60х90/8
Уч.изд. л. 15,62
Цена свободная