



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ISSN 1998-9903

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

**Научно-технический
и производственный журнал**

(26) 2 / 2024

**POWER ENGINEERING:
RESEARCH, EQUIPMENT,
TECHNOLOGY**

Scientific & Technical Journal

Известия высших учебных заведений. 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

Ответственный секретарь	ГРАЧЕВА Е.И.
--------------------------------	--------------

Научный редактор	КАЛИНИНА М.В.
-------------------------	---------------

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ВАК:

- ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ (ПО ВИДАМ ИЗМЕРЕНИЙ) (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

РИНЦ:

- 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**

**2024
Т.26, № 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

Журнал освещает фундаментальные и прикладные исследования, а также дискуссионные вопросы по проблемам энергетики и связанными с ней отраслями производства и науки.

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.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

АХМЕТОВА И.Г.
АРАКЕЛЯН Э.К.
БОРУШ О.В.
БОЧКАРЕВ И.В.
БРЯКИН И.В.
ВАНЬКОВ Ю.В.
ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В.
ГРАЧЕВА Е.И.
ДМИТРИЕВ А.В.
ДОВГУН В.П.
ЗВЕРЕВА Э. Р.
ИВШИН И.В.
КАЛАЙДА М.Л.
КАСИМОВ В.А.

КОРНИЛОВ В.Ю.
ЛАПТЕВ А.Г.
МЕЩЕРЯКОВ В.Н.
МИНГАЛЕЕВА Г.Р.
НИКОЛАЕВА Л.А.
ПЕТРОВ Т.И.
САФИН А.Р.
СУСЛОВ К.В.
ФЕДОТОВ А.И.
ЯКИМОВ Н.Д.
PENTIUC RADU DUMITRU
KOLCUN MICHAIL

Свидетельство о регистрации СМИ:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) – ПИ № ФС77-83199 от 31.03.2022 г.

Founder: Kazan State Power Engineering University

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief: EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV
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.

Sections:

Editorial board:

AKHMETOVA IRINA	IVSHIN IGOR	YAKIMOV NIKOLAY
ARAKELYAN EDIK	KALAJDA MARINA	KOLCUN MICHAIL
BORUSH OLESYA	KASIMOV VASIL	ILIYA K. ILIEV
BOCHKAREV IGOR	KORNILOV VLADIMIR	ION V. ION
BRYAKIN IGOR	LAPTEV ANATOLY	PENTIUC RADU DUMITRU
VANKOV YURY	MESHCHERYAKOV VIKTOR	STANIMIR VALTCHEV
GRACHEVA ELENA	MINGALEEVA GUZEL	DMITRIEV ANDREY
VAFIN DANIL	NIKOLAEVA LARISA	DOVGUN VALERY
GOLENISHCHEV-KUTUZOV	SUSLOV KONSTANTIN	SAFIN ALFRED
ALEXANDER		
ZVEREVA ELVIRA	FEDOTOV ALEXANDER	SHCHINNIKOV PAVEL

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 ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ДЕМИН А.В., ПАВЛОВ Г.И., НАКОРЯКОВ П.В., ЗАЙНУТДИНОВА Д.А. Снижение содержания диоксида углерода в выбросах при использовании метано-водородного топлива	3
--	---

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

КРОТОВА Е.В., САЧЕНКОВ О.А., МИТРАЙКИН В.И., ЗАЙЦЕВА Т.А., ЗАКИРОВ Р.Х. Применение рентгеновской компьютерной томографии для диагностики композитных конструкций в энергетике	15
ГАЛЯУТДИНОВА А.Р., ИВШИН И.В., СОЛОВЬЕВ С.А. Система оценки и прогнозирования технического состояния силового маслонаполненного трансформаторного оборудования распределительных сетей с применением машинного обучения	32

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

БАСЕНКО В.Р., ПЕТРОВ Т.И., ИБРАГИМОВА А.Р. Создание компьютерной модели синхронного двигателя для реализации проекта «Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для электротранспорта малой мощности»	46
САТТАРОВ Р.Р., ГАРАФУТДИНОВ Р.Р. Применение виртуального синхронного генератора в энергосистемах и его моделирование в программном комплексе Matlab	55
ШПИГАНОВИЧ А.Н., ШПИГАНОВИЧ А.А., ПЕТРОВ А.Р., ГРАЧЕВА Е.И. Тепловизионный контроль электрооборудования промышленных предприятий	68
ВОЗМИЛОВ А.Г., ИЛИМБЕТОВ Р.Ю., ПАНИШЕВ С.А., ЛИСОВ А.А. Анализ электрофильтров для очистки воздушной среды производственных помещений	78

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

БУРЯНИНА Н.С., ЛЕСНЫХ Е.В., ЛЕСНЫХ А.С., СУСЛОВ К.В., АРТЕМЬЕВА М.Л. Алгоритм фильтрации апериодической составляющей в сигнале тока короткого замыкания	97
---	----

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

САФИН А.Р., ШАКУРОВА З.М., ДОЛОМАНЮК Л.В., ГАВРИЛОВ В.А., ДЕНИСОВА Н.В. Особенности работы учебного стенда «Мотор электромобиля» при определении характеристик работы электротранспорта	105
НИКОЛАЕВ Ю.Е., АЙДАРОВ М.А. Оценка эффективности энергокомплексов с производством водорода, кислорода, тепла и электроэнергии	114
ГАПОНЕНКО С.О., КОНДРАТЬЕВ А.Е., КАЛИНИНА М.В., ДЕРБЕНЕВА А.А. Анализ применения энтропийных методов обработки вибродиагностических сигналов для оценки технического состояния трубопроводов	128
КРЮКОВ А.В., ОВЕЧКИН И.С., СУСЛОВ К.В. Моделирование режимов двойных замыканий на землю в системах электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта	138
ЧИЧИРОВ А.А., РАЗАКОВА Р.И., ГАЙНУТДИНОВ Ф.Р., ГАЙНУТДИНОВА Д.Ф. Водородная заправочная станция: обзор технологического состояния использования водородного топлива	149

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

ПАВЛОВ Г.И., ВАНЬКОВ Ю.В., ТЕЛЯШОВ Д.А., ЗАЙНУТДИНОВА Д.А., МУКАТДАРОВ А.А. Экспериментальное исследование влияния температуры инертных газов на интенсивность термического разложения резины	166
КУНИЦКИЙ В.А., ЛУКИН С.В. Характеристики теплообменника для локальной утилизации теплоты сточных вод при различных условиях эксплуатации	176

CONTENTS

ECOLOGICAL SAFETY

- DEMIN A.V., PAVLOV G.I., NAKORYAKOV P.V., ZAINUTDINOVA D.A. 3
Reducing carbon dioxide emissions when using methane-hydrogen fuel

METHODS AND INSTRUMENTS OF CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT

- KROTOVA E.V., SACHENKOV O.A., KROTOVA E.V., MITRYAKIN V.I., 15
ZAITSEVA T.A., ZAKIROV R.H. The use of X-Ray computed tomography for the diagnosis of composite structures in the energy sector
- GALYAUTDINOVA A.R., IVSHIN I.V., SOLOVEV S.A. System for assessment 32
and prediction of the technical condition of power oil-filled transformer equipment of distribution networks using machine learning

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

- BASENKO V.R., PETROV T.I., IBRAGIMOVA A.R. Creating a computer model 46
of a synchronous motor for the implementation of the project «Creation of a series of electric motors with a modernized rotor for electric transport of low power»
- SATTAROV R.R., GARAFUTDINOV R.R. Application of virtual synchronous 55
generator technology in power systems and its modeling in the Matlab software package
- SHPIGANOVICH A.N., SHPIGANOVICH A.A., PETROV A.R., GRACHEVA 68
E.I. Thermal imaging control of electrical equipment of industrial enterprises
- VOZMILOV A.G., ILIMBETOV R.YU., PANISHEV S.A., LISOV A.A. Analysis 78
of electric filters for cleaning the air environment of production premises

ELECTRIC POWER INDUSTRY

- BURYANINA NS., LESNYKH EV., LESNYKH AS., SUSLOV KV., 97
ARTEMYEVA ML. On the question of determining the location of a short circuit on a power transmission line

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

- SAFIN A.R., SHAKUROVA Z.M., DOLOMANYUK L.V., GAVRILOV V.A., 105
DENISOVA N.V. Features of the operation of the training stand «Electric vehicle motor» in determining the operation characteristics of electric transport
- NIKOLAEV Y.E., AIDAROV M.A. Evaluation of the efficiency of energy 114
complexes with the production of hydrogen, oxygen, heat and electricity
- GAPONENKO S.O., KONDRATIEV A.E., KALININA M.V., DERBENEVA A.A. 128
Analysis of application of entropy methods of vibration diagnostic signal processing to assess technical condition of pipelines
- KRYUKOV A.V., OVECHKIN I.S., SUSLOV K.V. Modeling of double ground 138
fault modes in power supply systems of non-traction consumers of railway transport
- CHICHIROV A.A., RAZAKOVA R.I., GAINUTDINOV F.R., GAINUTDINOVA 149
D.F. Hydrogen fueling station: review of the technological state of hydrogen fuel usage

THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

- PAVLOV G., VANKOV Y.V., TELYASHOV D.A., ZAYNUTDINOVA D.A., 166
MUKATDAROV A.A. Experimental study of the effect of the temperature of inert gases on the intensity of thermal decomposition of rubber
- KUNITSKIY V.A., LUKIN S.V. The characteristics of heat exchanger for local 176
utilization of wastewater heat under different operating conditions

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



УДК 620.9+504.06

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-2-3-14

СНИЖЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ВЫБРОСАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТАНО-ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

Демин¹ А.В., Павлов² Г.И., Накоряков² П.В., Зайнутдинова² Д.А.

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технический университет,
г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3658-7830>, alexei_demin@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Определение оптимальных режимов декарбонизации метана, а также оценка выбросов CO₂ при последующем сжигании пиролизного газа, в том числе и совместно с природным газом в различных соотношениях. МЕТОДЫ. Рассматривались процессы термохимической конверсии метана в водород и конденсированный углерод в реакторе с внешним нагревом стенок. Тепловая энергия, необходимая для пиролиза газа, получается за счет сжигания смеси воздуха и части пиролизного газа, очищенного от частиц твердого углерода. При выполнении численных исследований процессов пиролиза была использована кинетическая модель одномерного течения реагирующей смеси при внешнем подводе тепловой энергии через стенки осесимметричного канала (трубчатый реактор). РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработан механизм химического взаимодействия при термическом разложении метана, с учетом образования конденсированного углерода, в температурном диапазоне от 1000 до 1200 °С. Определены основные энергетические показатели и состав пиролизного газа при различных значениях температуры пиролиза и степени конверсии углерода. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Проведены оценки выбросов CO₂ при сжигании пиролизного газа, в том числе совместно с природным газом. При разработке технологий пиролиза, и их применении в промышленных масштабах целесообразно использовать часть получаемого пиролизного газа с высоким содержанием водорода для обеспечения тепловой энергией процессов термического разложения исходного сырья. По результатам расчетов доля этой части достигает ≈ 35 % от общего количества пиролизного газа. Такой подход, в отличие от сжигания для этой цели природного газа, существенно снизит выбросы CO₂. Сжигание получаемого пиролизного газа, даже без удаления остаточных углеводородов, характеризуется вполне приемлемыми в настоящее время коэффициентами выбросов CO₂ ≈ 7-25 т CO₂/ТДж.

Ключевые слова: природный газ; пиролиз; горение; выбросы парниковых газов; моделирование; численные исследования.

Для цитирования: Демин А.В., Павлов Г.И., Накоряков П.В., Зайнутдинова Д.А. Снижение содержания диоксида углерода в выбросах при использовании метано-водородного топлива // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 3-14. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-3-14.

REDUCING CARBON DIOXIDE CONTENT IN EMISSIONS WHEN USING METHANE-HYDROGEN FUEL

Demin¹ A.V., Pavlov² G.I., Nakoryakov² P.V., Zainutdinova² D.A.

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI,
Kazan, Russia

Abstract: AIM. To determine optimal modes for methane decarbonization, as well as to assess CO₂ emissions during subsequent combustion of the pyrolysis gas, including together with the natural gas in various ratios. METHODS. The processes of thermochemical conversion of methane into hydrogen and condensed carbon in a reactor with external heating of the walls were considered. The thermal energy required for gas pyrolysis is obtained by burning a mixture of air and part of the pyrolysis gas, which is free from solid carbon particles. When performing numerical studies of pyrolysis processes, a kinetic model of one-dimensional flow of the reacting mixture was used with an external supply of thermal energy through the walls of an axisymmetric channel (tubular reactor). RESULTS. The mechanism of chemical interaction during the thermal decomposition of methane was developed, taking into account the formation of condensed carbon in the temperature range from 1000 to 1200 °C. The main energy indicators and the composition of pyrolysis gas were determined at various values of the pyrolysis temperature and the degree of carbon conversion. CONCLUSION. Carbon dioxide emissions from the combustion of pyrolysis gas, including together with the natural gas, were assessed. When developing pyrolysis technologies and applying them on an industrial scale, it is advisable to use part of the resulting pyrolysis gas with a high hydrogen content to provide thermal energy for the processes of thermal decomposition of the feedstock. According to the calculations, the share of this part reaches $\approx 35\%$ of the total amount of pyrolysis gas. This approach, as opposed to burning the natural gas for this purpose, significantly reduces CO₂ emissions. The combustion of the resulting pyrolysis gas, even without removing residual hydrocarbons, is characterized by currently quite acceptable CO₂ emission factors of $\approx 7\text{--}25 \text{ t CO}_2/\text{TJ}$.

Keywords: natural gas; pyrolysis; combustion; greenhouse gas emissions; modeling; numerical research.

For citation: Demin A.V., Pavlov G.I., Nakoryakov P.V., Zainutdinova D.A. Reducing carbon dioxide emissions when using methane-hydrogen fuel. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (2): 3-14. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-3-14.

Введение. Литературный обзор (Introduction. Literature Review)

В 2021 г. в Российской Федерации утверждена Стратегия социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. В Стратегии отмечается высокая значимость для отраслей экономики и населения рисков экстремальных погодных явлений и комплексного неблагоприятного воздействия, связанных с изменением климата. Для реализации целевого сценария Стратегии предусматриваются общетрасовые меры, в том числе, направленные на увеличение доли применения вторичных энергоресурсов, развития технологий улавливания, захоронения и последующего использования парниковых газов. В энергетике – развитие водородных технологий, включая производство водорода на основе углеводородного сырья. Глобальный переход энергетики к безуглеродным ресурсам и энергоресурсам с низким уровнем выбросов парниковых газов обуславливает высокую актуальность научных исследований в области технологий использования возобновляемых источников энергии, а также атомной и водородной энергетики.

В настоящее время интенсивно ведутся исследования и разработки наиболее эффективных технологий производства водорода [1-6]. Большое внимание в исследованиях уделяется поиску технологий, имеющих сравнительно низкую стоимость и минимальные выбросы CO₂. Доминирующим способом производства водорода является паровой риформинг метана, сопровождаемый достаточно высокими выбросами углекислого газа. Паровой риформинг требует значительных капитальных затрат и энергопотребления. Кроме того, при сжигании метана, обеспечивающим необходимое для процесса пиролиза тепло, образуется углекислый газ. Производство двух единиц объема водорода сопровождается выбросом одной единицы объема углекислого газа. Чистый водород необходимо отделять от CO₂, CH₄ и других примесей в потоках отходящих газов с использованием мембранных, криогенных или адсорбционных процессов разделения [7]. Разработка новых процессов получения водорода без сопутствующего образования CO₂ необходима для преодоления известных недостатков парового риформинга метана.

Альтернативным низкоуглеродным способом получения водорода считается каталитический и некаталитический пиролиз метана. Общая стоимость производства водорода пиролизом метана может быть сопоставима или даже ниже, чем стоимость

парового риформинга метана. Считается, что побочные углеродные продукты могут значительно компенсировать затраты на производство водорода [6].

Для каталитического пиролиза метана применяют четыре типа реакторов: реакторы с неподвижным слоем, псевдоожиженным слоем, плазменным слоем и реакторы с расплавленным металлом [3]. В лабораторных исследованиях используют чаще всего реакторы с неподвижным слоем. Их главный недостаток – заполнение реактора углеродным продуктом при длительных экспериментах. Более перспективным реактором для крупномасштабной эксплуатации является реактор с псевдоожиженным слоем, поскольку он подходит для непрерывного добавления частиц катализатора и удаления твердых углеродных побочных продуктов. Известны технические решения, основанные на применении реакторов с расплавленными средами: металлы (Ti, Pb, Sn, Ga); сплавы металлов (Ni-Bi, Cu-Bi); соли (KBr, NaBr, NaCl, NaF, MnCl₂, KCl). Основным преимуществом таких реакторов является легкое отделение углеродного продукта от жидкой среды за счет разницы плотностей. Основным недостатком является ограниченная стабильность расплавленных сред при необходимых высоких рабочих температурах (>900–1000 °C) и коррозия при высоких температурах. Значительно экономичнее использование углеродных катализаторов, имеющих более высокую стабильность при повышенных температурах, и не требующих регенерации [4, 8].

Критической проблемой процессов пиролиза CH₄ является эффективная подача тепла в реагирующую среду. Используемые в настоящее время способы подвода тепла можно условно разделить на четыре основных типа [9]. Первый тип — это печи с горячими стенками, нагрев которых осуществляется газовыми горелками или встроенными электронагревателями. Второй тип – нагрев реагирующей среды электродами, например, слой углеродных гранул, внутри печей напрямую передает тепло метану. Третий тип – подача тепла к газу CH₄ через плазму. Микроволновой нагрев – четвертый тип способа подачи тепла. В лабораторных исследованиях часто используют трубчатые реакторы, установленные в небольших печах со встроенными электронагревателями. Основным недостатком этих устройств является то, что образующиеся углеродные продукты осаждаются на нагретых поверхностях, блокируя поток газа внутри реактора.

Основные качественные закономерности процессов при пиролизе метана хорошо известны, например, [10]. На скорость пиролиза метана, прежде всего, оказывает значительное влияние уровень температур в реакторе. Также замечено влияние соотношения площади внутренней поверхности и объема реактора. Ускоряющее действие на начальных стадиях пиролиза оказывают добавки этана. Тормозящее действие на скорость пиролиза метана оказывает водород, адсорбирующий на стенках реактора. Однако полного понимания комплексных взаимосвязанных процессов при пиролизе метана еще не достигнуто [11-15].

Одним из главных аспектов при моделировании пиролиза метана является подход к описанию процессов образования и роста концентрации конденсированного углерода (пироуглерода). Например, в работе [15] эти процессы рассматриваются с помощью формальной гетерогенной реакции осаждения углерода на внутренних поверхностях трубчатого реактора. Подбор значений коэффициента переноса массы к поверхности и константы скорости гетерогенной реакции осуществлялся с помощью статистической обработки результатов серии экспериментов.

В данной работе рассматриваются процессы термохимической конверсии метана в водород и конденсированный углерод в реакторе с внешним нагревом стенок. Тепловая энергия, необходимая для пиролиза газа, получается за счет сжигания смеси воздуха и части генерируемого пиролизного газа, очищенного от частиц твердого углерода.

Основной целью работы являлось определение оптимальных режимов декарбонизации CH₄, а также оценка выбросов CO₂ при последующем сжигании пиролизного газа, в том числе и совместно с природным газом в различных соотношениях.

Новизна результатов исследования: определены энергетические показатели и состав пиролизных газов при декарбонизации метана; получены оценочные значения выбросов CO₂ при сжигании пиролизных газов; выявлено относительное количество пиролизного газа, необходимого для обеспечения тепловой энергией процессов пиролиза. Полученные результаты имеют практическую значимость при создании технологических установок для пиролиза природного газа, а также применения пиролизных газов как топлива в тепловых энергоустановках.

Материалы и методы (Materials and methods)

Численные исследования проводились для следующей схемы организации рабочих процессов (рис. 1).

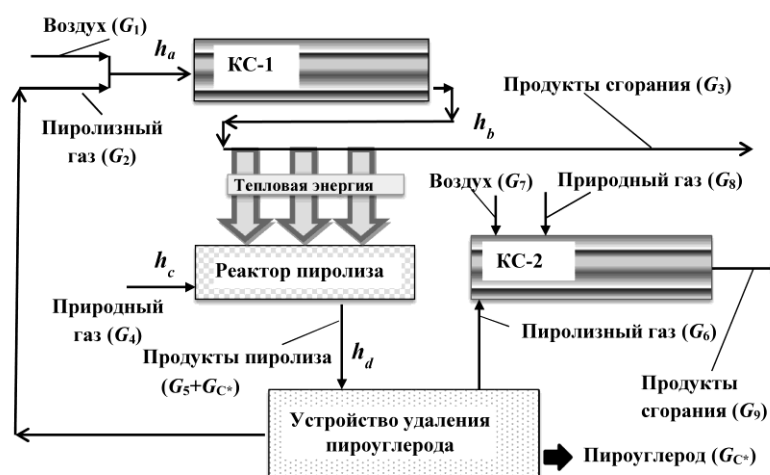


Рис. 1. Схема организации процессов.

Fig. 1. Process organization scheme.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Процессы пиролиза моделировались при внешнем нагреве стенок реактора пиролиза. Источником тепловой энергии являлись продукты сгорания, получаемые при сжигании в смеси с воздухом определенной части пиролизного газа с высоким содержанием водорода.

При выполнении численных исследований процессов пиролиза была использована кинетическая модель (1-D) [16]. Рассматривалось одномерное течение реагирующей смеси при внешнем подводе тепловой энергии через стенки осесимметричного канала (трубчатый реактор). Система уравнений включала обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ) изменения состава смеси вследствие химических реакций, и алгебраические уравнения энтальпии, температуры, скорости и давления. Для решения системы уравнений использовалась конечно-разностная аппроксимация ОДУ с последующим применением итерационной схемы Ньютона.

Химическое преобразование исходных реагентов в промежуточные и конечные продукты представлено следующим механизмом, состоящим из элементарных химических реакций (табл. 1). Реакции и параметры константы скорости реакций выбирались для характерных условий процессов пиролиза природного газа при температурах выше 1000 °C [17].

Для моделирования образования конденсированного углерода был применен метод «больших молекул» (МБМ), эффективно применяемый для расчета химического взаимодействия в гетерогенных реагирующих смесях, например, [16]. Такой подход, как математический прием, существенно упрощает алгоритм расчета, поскольку сложная гетерогенная система формально рассматривается как газообразная. Основой МБМ является представление конденсированной фазы в виде условных молекул с числом атомов $n=10^3$. Таким образом, условная молекула конденсированного углерода содержит 1000 атомов углерода C_{1000} (далее C^*). При выполнении расчетов принято начальное значение мольной доли $C^* \leq 10^{-10}$. Таким образом, первичная стадия образования частиц конденсированной фазы не учитывается. Как показал анализ полученных результатов, это условие практически не оказывает влияния на дальнейший рост концентрации C^* , который формально описывается с помощью реакций 30 и 31 (табл. 1). Значения параметров (A , n , E) констант скоростей этих реакций определялись при тестировании данного механизма и сравнении результатов с экспериментальными данными [11, 12].

Таблица 1

Table 1

Механизм химических реакций пиролиза метана
Mechanism of chemical reactions of methane pyrolysis

№	Химическая реакция	$\lg(A)$, см ³ , моль, с	n	E , кал/моль
1	$CH_3 + H_2 \rightleftharpoons CH_4 + H$	2,819	3	7740
2	$CH_3 + H + M \rightleftharpoons CH_4 + M$	26,9	-3	0
3	$CH_3 + H \rightleftharpoons CH_4$	16,78	-1	0
4	$CH_3 + H \rightleftharpoons CH_2 + H_2$	14,255	0	15057
5	$2CH_3 \rightleftharpoons C_2H_4 + H_2$	16,0	0	32026
6	$2CH_3 \rightleftharpoons C_2H_6 + H_2$	13,479	0	13513

Продолжение таблицы 1
Continuation of Table 1

7	$\text{CH}_3 + \text{M} \rightleftharpoons \text{CH}_2 + \text{H} + \text{M}$	16,0	0	90583
8	$\text{CH}_2 + \text{CH}_3 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}$	13,602	0	0
9	$\text{CH}_2 + \text{H} \rightleftharpoons \text{CH} + \text{H}_2$	13,602	0	0
10	$\text{CH} + \text{H} \rightleftharpoons \text{C} + \text{H}_2$	14,176	0	0
11	$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{M} \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H} + \text{H} + \text{M}$	16,623	0	107000
12	$\text{C}_2\text{H} + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}$	5,612	2,39	864,3
13	$\text{C}_2\text{H}_6 + \text{H} \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_5 + \text{H}_2$	2,7324	3	5210
14	$\text{C}_2\text{H}_6 + \text{CH}_3 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_5 + \text{CH}_4$	-0,2596	3,5	8293
15	$\text{C}_2\text{H}_6 + \text{M} \rightleftharpoons 2\text{CH}_3 + \text{M}$	17,0	0	68117
16	$\text{C}_2\text{H}_6 \rightleftharpoons 2\text{CH}_3$	16,28	0	87476
17	$\text{C}_2\text{H}_5 + \text{H} \rightleftharpoons 2\text{CH}_3$	13,477	0	0
18	$2\text{C}_2\text{H}_5 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_6$	12,146	0	0
19	$\text{C}_2\text{H}_5 + \text{M} \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4 + \text{H} + \text{M}$	17,0	0	31070
20	$\text{C}_2\text{H}_5 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}$	12,079	0	34894
21	$\text{C}_2\text{H}_5 + \text{H} \rightleftharpoons 2\text{CH}_3$	13,47	0	0
22	$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H} \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_3 + \text{H}_2$	14,176	0	10205
23	$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{CH}_3 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_3 + \text{CH}_4$	11,623	0	11113
24	$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{M} \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2 + \text{M}$	17,4149	0	79349
25	$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{M} \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_3 + \text{H} + \text{M}$	17,4149	0	96558
26	$\text{C}_2\text{H}_3 + \text{M} \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_2 + \text{H} + \text{M}$	15,477	0	32026
27	$\text{C}_2\text{H}_3 + \text{H} \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2$	13,301	0	0
28	$\text{C}_2\text{H}_3 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}$	14,204	0	38000
29	$2\text{H} + \text{M} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{M}$	17,806	-1	0
30	$\text{C}^* + \text{CH} \rightarrow 1.001\text{C}^* + \text{H}$	13,0	1,42	0
31	$\text{C}^* + \text{C}_2\text{H} \rightarrow 1.002\text{C}^* + \text{H}$	13,0	1,42	0

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Эффективность процессов пиролиза оценивалась с использованием следующих показателей:

g_{C} – массовая доля углерода в природном газе;

g_{C^*} – массовая доля конденсированного углерода в продуктах пиролиза;

g_{r} – массовая доля пиролизного газа;

$g_{\text{см}}$ – массовая доля природного газа в смеси с пиролизным газом;

$\xi = g_{\text{C}^*} / g_{\text{C}}$ – степень конверсии углерода, содержащегося в природном газе;

H_{r} – низшая теплота сгорания пиролизного газа, МДж/кг;

$H_{\text{см}}$ – низшая теплота сгорания смеси природного и пиролизных газов, МДж/кг

$Q = H_{\text{r}} \cdot g_{\text{r}}$ – энергетический потенциал пиролизного газа, полученного при пиролизе 1 кг природного газа, МДж;

h_a – удельная массовая энтальпия смеси пиролизного газа и воздуха, подаваемой в камеру сгорания КС-1, кДж/кг;

h_b – удельная массовая энтальпия продуктов сгорания после передачи тепла в реактор пиролиза, кДж/кг;

h_c – удельная массовая энтальпия природного газа, подаваемого в реактор пиролиза, кДж/кг;

h_d – удельная массовая энтальпия продуктов пиролиза на выходе из реактора пиролиза, кДж/кг;

G_i – массовый расход i -го компонента, кг/с;

$G_4 = (G_1 + G_2) \cdot (h_b - h_a) / (h_c - h_d)$ – массовый расход природного газа, подаваемого в реактор пиролиза, кг/с;

$G_5 = G_4 \cdot (1 - g_{\text{C}^*})$ – массовый расход пиролизного газа на выходе из реактора пиролиза, кг/с;

$\eta = 100 \cdot (G_2 / G_5)$ – доля пиролизного газа, поступающего в камеру сгорания КС-1, %.

Показатели, характеризующие выбросы CO_2 при сжигании топлива:

G_C – количество углерода в топливе, т С/т;

$W_C = G_C \cdot 10^3 / H_f$ – энергетический эквивалент содержания углерода, т С/ТДж;

$EF_{\text{CO}_2} = W_C \cdot 44 / 12$ – коэффициент выбросов CO_2 при сжигании топлива, т CO_2 /ТДж.

Обсуждение результатов (Discussing the results)

Пиролиз метана в смеси с инертным газом Ar в трубчатом реакторе моделировался для условий проведения экспериментов [11] при давлении 0,1 МПа и температуре стенок 1100 °С. Начальный состав смеси метана и аргона в мольных долях: $r_{\text{CH}_4} = 0,1$; $r_{\text{Ar}} = 0,9$. Некоторые из полученных результатов показаны на рисунке 2.

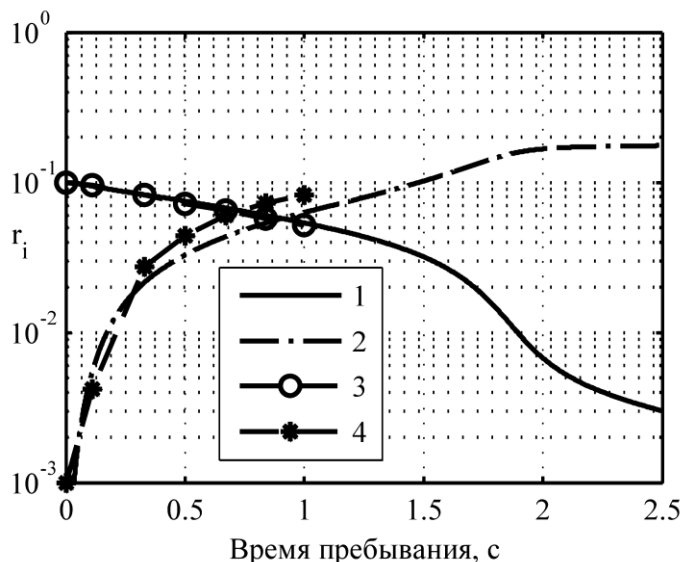


Рис. 2. Изменение мольных долей CH_4 и H_2 : 1 – расчетные значения r_{CH_4} ; 2 – расчетные значения r_{H_2} ; 3 – экспериментальные значения r_{CH_4} [11]; 4 – экспериментальные значения r_{H_2} [11].

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Основным результатом этого этапа работы является сформированный механизм химических реакций, в том числе в части моделирования изменения концентрации C^* (табл. 1). Этот механизм отражает основные закономерности, установленные экспериментально [10-12, 15]: скорость образования пироуглерода в значительной степени определяется кинетикой гомогенных газофазных и гетерогенных реакций, начальной концентрацией исходного углеводорода и временем пребывания смеси в области высоких температур. Кроме этого, скорость прямого образования пироуглерода из неароматического углеводорода снижается с уменьшением содержания углерода, которое можно оценить с помощью соотношения C/H в молекуле исходного углеводорода. При увеличении времени пребывания и протекании газофазных реакций образуются углеводородные соединения с более высоким соотношением C/H. Образование таких соединений может иметь сильное положительное влияние на рост концентрации пироуглерода, включая осаждение частиц на активных центрах.

При моделировании пиролиза природного газа были приняты следующие условия: давление 0,1 МПа; температура стенок трубчатого реактора $T_w = 1000, 1100, 1200$ °С, соответственно. Начальный состав смеси в мольных долях: $r_{\text{CH}_4} = 0,98$; $r_{\text{C}_2\text{H}_6} = 0,02$. Для определения потенциального количества природного газа, подаваемого в реактор пиролиза, было принято условие, что массовый расход G_2 пиролизного газа, поступающего в камеру сгорания КС-1 при последующем отводе тепла от высокотемпературных продуктов сгорания в реактор пиролиза, равен 1 кг/с.

Некоторые из результатов расчетов приведены в таблицах 2-4. Время пиролиза τ приведено для различных значений степени конверсии углерода ξ .

Таблица 2
Table 2Показатели процессов пиролиза и состав пиролизного газа ($T_w = 1000$ °C)*Pyrolysis process parameters and pyrolysis gas composition (°C)*

Наименование показателя	Значение показателя			
Время пиролиза τ , с	28,85	38,01	54,77	97,78
Степень конверсии углерода ξ	0,80	0,85	0,90	0,95
Массовая доля пироуглерода g_{C^*}	0,5990	0,638	0,6761	0,7131
Массовая доля пиролизного газа g_r	0,401	0,362	0,3239	0,2869
Низшая теплота сгорания пиролизного газа H_r , МДж/кг	84,932	91,107	98,622	107,917
Энергетический потенциал пиролизного газа, МДж	34,058	32,981	31,944	30,961
H ₂ , об. %	89,005	92,016	94,844	97,492
CH ₄ , об. %	10,745	7,849	5,096	2,492
C ₂ H ₂ , об. %	0,228	0,123	0,055	0,015
C ₂ H ₄ , об. %	0,0203	0,0111	0,00505	0,0014
C ₂ H ₆ , об. %	0,0012	0,00062	0,00026	6,127e-05
Потенциальный массовый расход природного газа на пиролиз G_4 , кг/с	9,512	9,903	10,397	11,047
Потенциальный массовый расход пиролизного газа, G_5 , кг/с	3,814	3,585	3,368	3,169
Доля пиролизного газа, поступающего в КС-1 η , %	26,216	27,896	29,694	31,551
G_C , т С/т газа	0,376	0,309	0,228	0,128
W_C , т С/ТДж	4,434	3,396	2,312	1,185
EF_{CO_2} , т CO ₂ /ТДж	16,260	12,453	8,479	4,346

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 3
Table 3Показатели процессов пиролиза и состав пиролизного газа ($T_w=1100$ °C)*Pyrolysis process parameters and pyrolysis gas composition ($T_w=1100$ °C)*

Наименование показателя	Значение показателя			
Время пиролиза τ , с	6,19	6,79	7,81	9,72
Степень конверсии углерода ξ	0,80	0,85	0,90	0,95
Массовая доля пироуглерода g_{C^*}	0,583	0,631	0,673	0,713
Массовая доля пиролизного газа g_r	0,417	0,369	0,327	0,287
Низшая теплота сгорания пиролизного газа H_r , МДж/кг	83,302	90,189	98,089	107,678
Энергетический потенциал пиролизного газа, МДж	34,720	33,279	32,085	30,936
H ₂ , об. %	88,396	91,759	94,735	97,456
CH ₄ , об. %	10,791	7,866	5,095	2,489
C ₂ H ₂ , об. %	0,782	0,360	0,163	0,052
C ₂ H ₄ , об. %	0,0291	0,0144	0,0065	0,00201

Продолжение таблицы 3
Continuation of Table 3

C_2H_6 , об. %	0,00206	0,00105	0,00045	0,00011
Потенциальный массовый расход природного газа на пиролиз G_4 , кг/с	8,736	9,268	9,80	10,403
Потенциальный массовый расход пиролизного газа, G_5 кг/с	3,641	3,419	3,2	2,989
Доля пиролизного газа, поступающего в КС-1 η , %	27,464	29,24	31,194	33,456
G_C , т С/т газа	0,400	0,322	0,235	0,131
W_C , т С/ТДж	4,803	3,573	2,399	1,217
EF_{CO_2} , т CO_2 /ТДж	17,611	13,101	8,798	4,464

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 4

Table 4

Показатели процессов пиролиза и состав пиролизного газа ($T_w=1200$ °C)Pyrolysis process parameters and pyrolysis gas composition ($T_w=1200$ °C)

Наименование показателя	Значение показателя			
Время пиролиза τ , с	3,03	3,12	3,28	3,62
Степень конверсии углерода ξ	0,80	0,85	0,90	0,95
Массовая доля пироуглерода g_{C^*}	0,556	0,615	0,665	0,709
Массовая доля пиролизного газа g_r	0,443	0,385	0,334	0,290
Низшая теплота сгорания пиролизного газа H_r , МДж/кг	80,847	88,167	96,873	107,162
Энергетический потенциал пиролизного газа, МДж	35,864	33,962	32,385	31,109
H_2 , об. %	87,418	91,149	94,441	97,363
CH_4 , об. %	10,769	7,919	5,189	2,527
C_2H_2 , об. %	1,767	0,906	0,359	0,107
C_2H_4 , об. %	0,0425	0,0230	0,0100	0,0031
C_2H_6 , об. %	0,00285	0,00151	0,00063	0,00015
Потенциальный массовый расход природного газа на пиролиз G_4 , кг/с	7,977	8,627	9,341	10,037
Потенциальный массовый расход пиролизного газа, G_5 кг/с	3,538	3,323	3,123	2,914
Доля пиролизного газа, поступающего в КС-1 η , %	28,259	30,091	32,025	34,322
G_C , т С/т газа	0,436	0,350	0,251	0,137
W_C , т С/ТДж	5,393	3,974	2,593	1,284
EF_{CO_2} , т CO_2 /ТДж	19,775	14,571	9,507	4,707

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Наиболее заметное влияние на скорость разложения углеводородов оказывает уровень температур. При температурах около 1200 °C время пиролиза $\tau \leq 4$ с; степень конверсии углерода ξ достигает 0,95. С увеличением ξ возрастает концентрация водорода и, соответственно, увеличивается значение теплоты сгорания пиролизного газа. Однако для выбранной схемы организации процессов (рис. 1) для повышения ξ требуется увеличивать

количество части пиролизных газов, используемых для обеспечения тепловой энергией процессов пиролиза.

Показатели, характеризующие выбросы CO_2 , при сжигании пиролизных газов в смеси с природным газом приведены в таблицах 5 и 6. В таблице 5 – для состава пиролизного газа, полученного при $T=1000\text{ }^\circ\text{C}$ и $\xi=0,8$; в таблице 6 – при $T=1200\text{ }^\circ\text{C}$ и $\xi=0,95$.

Таблица 5
Table 5

Показатели выбросов CO_2 для сжигания смеси природного и пиролизного газов
CO₂ emission rates for combustion of natural and pyrolysis gas mixture

Показатель	Значение показателя					
$g_{\text{см}}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$H_{\text{см}}$, МДж/кг	81,43	77,927	74,425	70,922	67,42	63,918
$G_{\text{с}}$, т С/т газа	0,413	0,451	0,488	0,526	0,563	0,6
$W_{\text{с}}$, т С/ТДж	5,077	5,785	6,559	7,41	8,349	9,392
EF_{CO_2} , т CO_2 /ТДж	18,61	21,21	24,05	27,17	30,62	34,44

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 6
Table 6

Показатели выбросов CO_2 для сжигания смеси природного и пиролизного газов
CO₂ emission rates for combustion of natural and pyrolysis gas mixture

Показатель	Значение показателя					
$g_{\text{см}}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$H_{\text{см}}$, МДж/кг	101,44	95,711	89,986	84,26	78,535	72,81
$G_{\text{с}}$, т С/т газа	0,199	0,260	0,321	0,382	0,444	0,505
$W_{\text{с}}$, т С/ТДж	1,96	2,717	3,57	4,539	5,65	6,935
EF_{CO_2} , т CO_2 /ТДж	7,19	9,96	13,09	16,64	20,72	25,42

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При сжигании только природного газа коэффициент выбросов $EF_{\text{CO}_2} \approx 55\text{ т } \text{CO}_2/\text{ТДж}$. На выбросы CO_2 в наибольшей степени влияет содержание остаточного углерода в получаемых пиролизных газах; чем выше значения ξ , тем меньше оценочные значения выбросов CO_2 .

Заключение (Conclusions)

Разработан и предложен к использованию механизм термического разложения метана с учетом образования конденсированного углерода в температурном диапазоне от 1000 до 1200 $^\circ\text{C}$.

Выполнены численные исследования пиролиза смеси метана и этана, близкой по содержанию компонентов к природному газу, и проведены оценки выбросов CO_2 при последующем сжигании пиролизного газа, в том числе совместно с природным газом. Совместное сжигание такой смеси рассматривается как промежуточное техническое решение при достаточно долговременном запланированном переходе к водородной энергетике. При разработке технологий пиролиза, и их применении в промышленных масштабах целесообразно использовать часть получаемого пиролизного газа с высоким содержанием водорода для обеспечения тепловой энергией процессов термического разложения исходного сырья. По результатам расчетов доля этой части достигает $\approx 35\%$ от общего количества пиролизного газа. Такой подход, в отличие от сжигания для этой цели природного газа, существенно снизит выбросы CO_2 . Сжигание получаемого пиролизного газа, даже без удаления остаточных углеводородов, характеризуется вполне приемлемыми в настоящее время коэффициентами выбросов $\text{CO}_2 \approx 7\text{--}25\text{ т } \text{CO}_2/\text{ТДж}$.

Литература

1. Weger L., Abánades A., Butler T. Methane cracking as a bridge technology to the hydrogen economy // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. V. 42 (1). pp. 720 – 731. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.029.
2. Яруллин Р.С., Салихов И.З., Черезов Д.С., Нурисламова А.Р. Перспективы водородных технологий в энергетике и в химической промышленности // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 2. С. 70 – 83. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-70-83.
3. Korányi T.I., Németh M., Beck A. and Horváth A. Recent advances in methane pyrolysis: turquoise

hydrogen with solid carbon production // *Energies*. 2022. V.15 (17). 6342. doi:10.3390/en15176342.

4. Sánchez-Bastardo N., Schlögl R., Ruland H. Methane pyrolysis for CO₂-free H₂ production: A green process to overcome renewable energies unsteadiness // *Chemie Ingenieur Technik*. 2020. V. 92 (10). pp. 1596–1609. doi: 10.1002/cite.202000029

5. Schneider S., Bajohr S., Graf F and Kolb T. State of the art of hydrogen production via pyrolysis of natural gas // *Chemie Ingenieur Technik*. 2020. V. 92 (8). pp. 1023 – 1032. doi:10.1002/cite.202000021.

6. Chan Y., Chan Z., Lock S., et al. Thermal pyrolysis conversion of methane to hydrogen (H₂): A review on process parameters, reaction kinetics and techno-economic analysis // *Chinese Chemical Letters*. 2023. 109329. doi: 10.1016/j.ccllet.2023.109329.

7. Филимонова А.А., Власова А.Ю., Камалиева Р.Ф. Методы декарбонизации процесса получения электроэнергии в твердооксидном топливном элементе / 2022. Т.24. № 6. С. 72 – 82. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-72-82.

8. Директор Л.Б., Зайченко В. М., Майков И. Л., и др. Исследование процесса пиролиза метана при фильтрации через нагретую пористую среду // *Теплофизика высоких температур*. 2001. Т. 39 (1). С. 89 – 96. doi:10.1023/A:1004178732334.

9. Prabowo J., Lai L., Chivers B., et al. Solid carbon co-products from hydrogen production by methane pyrolysis: current understandings and recent progress // *Carbon*. 2024. V. 216. 118507. doi: 10.1016/j.carbon.2023.118507.

10. Арутюнов В.С., Веденеев В.И. Пиролиз метана в области температур 1000-1700 К // *Успехи химии*. 1991. Т. 60. № 12. С. 2663 – 2684. doi:10.1070/RC1991v060n12ABEH001154.

11. Becker A., Hüttinger K.J. Chemistry and kinetics of chemical vapor deposition of pyrocarbon — IV pyrocarbon deposition from methane in the low temperature regime // *Carbon*. 1998. V. 36 (3). pp. 213 – 224. doi:10.1016/S0008-6223(97)00177-2.

12. Abánades A., Ruiz a E., Ferruelo E.M., et al. Experimental analysis of direct thermal methane cracking // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. V. 36 (20). pp. 12877–12886. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.07.081.

13. Fau G., Gascoin N., Gillard P. and Steelant J. Methane pyrolysis: Literature survey and comparisons of available data for use in numerical simulations // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2013. V. 104. pp. 1 – 9. doi:10.1016/j.jaap.2013.04.006.

14. Shinde V., Pradeep P. Detailed gas-phase kinetics and reduced reaction mechanism for methane pyrolysis involved in CVD/CVI processes // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2021. V. 154. 104998. doi:10.1016/j.jaap.2020.104998.

15. Becker T., Richter M., Agar D.W. Methane pyrolysis: Kinetic studies and mechanical removal of carbon deposits in reactors of different materials // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. V. 48 (6). pp. 2112 – 2129. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.10.069.

16. Naoumov V. I., Krioukov V.G., Abdullin A.L., and Demin A.V.. Chemical kinetics in combustion and reactive flows: modeling tools and applications. – Cambridge University Press, 2019. doi:10.1017/9781108581714

17. NIST Chemical Kinetics Database / J.A. Manion, R.E. Huie, R. D. Levin et al. // NIST Standard Reference Database 17, Version 7.0 (Web Version), Release 1.6.8. Data version 2015.09. Gaithersburg, Maryland : National Institute of Standards and Technology. Доступно по: <http://kinetics.nist.gov>. Ссылка активна на 10 февраля 2024.

Авторы публикации

Демин Алексей Владимирович – докт. техн. наук, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда», Казанский государственный энергетический университет.

Павлов Григорий Иванович – докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Специальные технологии в образовании» КНИТУ-КАИ.

Накоряков Павел Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Специальные технологии в образовании» КНИТУ-КАИ.

Зайнутдинова Динара Айдаровна – аспирант КНИТУ-КАИ

References

1. Weger L., Abánades A., Butler T. Methane cracking as a bridge technology to the hydrogen economy // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. V. 42 (1). pp. 720 – 731. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.029.
2. Yarullin RS, Salikhov IZ, Cherezov DS, Nurislamova AR. Prospects of hydrogen technologies in power and chemical industries. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021; 23 (2): 70-83. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-70-83.
3. Korányi T.I, Németh M., Beck A. and Horváth A. Recent advances in methane pyrolysis: turquoise hydrogen with solid carbon production // *Energies*. 2022. V.15 (17). 6342. doi:10.3390/en15176342.
4. Sánchez-Bastardo N., Schlögl R., Ruland H. Methane pyrolysis for CO₂-free H₂ production: A green process to overcome renewable energies unsteadiness // *Chemie Ingenieur Technik*. 2020. V. 92 (10). pp. 1596–1609. doi: 10.1002/cite.202000029
5. Schneider S., Bajohr S., Graf F and Kolb T. State of the art of hydrogen production via pyrolysis of natural gas // *Chemie Ingenieur Technik*. 2020. V. 92 (8). pp. 1023 – 1032. doi:10.1002/cite.202000021.
6. Chan Y., Chan Z., Lock S., et al. Thermal pyrolysis conversion of methane to hydrogen (H₂): A review on process parameters, reaction kinetics and techno-economic analysis // *Chinese Chemical Letters*. 2023. 109329. doi: 10.1016/j.ccllet.2023.109329.
7. Filimonova A.A., Vlasova A.Y., Kamaliev R.F. Generating electricity in a solid oxide fuelcell decarbonization methods. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24 (6): 72-82. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-72-82.
8. Direktor L.B., Zaichenko V.M., Maikov I.L., et al. Investigation of pyrolysis of methane under conditions of filtering through a heated porous medium // *High Temperature*. 2001. V. 39 (1). pp. 85 – 92. doi:10.1023/A:1004178732334.
9. Prabowo J., Lai L., Chivers B., et al. Solid carbon co-products from hydrogen production by methane pyrolysis: current understandings and recent progress // *Carbon*. 2024. V. 216. 118507. doi: 10.1016/j.carbon.2023.118507.
10. Arutyunov V.S., Vedenev V.I. Pyrolysis of methane in the temperature range 1000-1700 K // *Russian Chemical Reviews*. 1991. V. 60 (12). pp. 2663 – 2684. doi:10.1070/RC1991v060n12ABEH001154.
11. Becker A., Hüttinger K.J. Chemistry and kinetics of chemical vapor deposition of pyrocarbon — IV pyrocarbon deposition from methane in the low temperature regime // *Carbon*. 1998. V. 36 (3). pp. 213 – 224. doi:10.1016/S0008-6223(97)00177-2.
12. Abánades A., Ruiz a E., Ferruelo E.M., et al. Experimental analysis of direct thermal methane cracking // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. V. 36 (20). pp. 12877–12886. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.07.081.
13. Fau G., Gascoin N., Gillard P. and Steelant J. Methane pyrolysis: Literature survey and comparisons of available data for use in numerical simulations // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2013. V. 104. pp. 1 – 9. doi:10.1016/j.jaap.2013.04.006.
14. Shinde V., Pradeep P. Detailed gas-phase kinetics and reduced reaction mechanism for methane pyrolysis involved in CVD/CVI processes // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2021. V. 154. 104998. doi:10.1016/j.jaap.2020.104998.
15. Becker T., Richter M., Agar D.W. Methane pyrolysis: Kinetic studies and mechanical removal of carbon deposits in reactors of different materials // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. V. 48 (6). pp. 2112 – 2129. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.10.069.
16. Naoumov V. I., Krioukov V.G., Abdullin A.L., and Demin A.V.. *Chemical kinetics in combustion and reactive flows: modeling tools and applications*. – Cambridge University Press, 2019. doi:10.1017/9781108581714
17. NIST Chemical Kinetics Database / J.A. Manion, R.E. Huie, R. D. Levin et al. // NIST Standard Reference Database 17, Version 7.0 (Web Version), Release 1.6.8. Data version 2015.09. Gaithersburg, Maryland : National Institute of Standards and Technology. Available at: <http://kinetics.nist.gov>. Accessed: 10 Feb 2024.

Authors of the publication

Alexey V. Demin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Grigory I. Pavlov –Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.

Pavel V. Nakoryakov – Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.

Dinara A. Zainutdinova –Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.10.2. Экологическая безопасность (в энергетике)

Получено **27.03.2024 г.**

Отредактировано **11.04.2024 г.**

Принято **16.04.2024 г.**

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



УДК 678.5.067

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-2-15-31

ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Кротова¹ Е.В., Саченков² О.А., Митряйкин¹ В.И., Зайцева¹ Т.А., Закиров³ Р.Х.

¹Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им. А. Н. Туполева — КАИ, г. Казань, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

³ГАУЗ «Республиканская клиническая инфекционная больница имени профессора А.Ф.Агафонова», г. Казань, Россия
tanechkaGA@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ В современной России важным условием развития Крайнего Севера и дальневосточных регионов является обеспечение этих регионов электроэнергией. В удаленных районах с повышенным потенциалом ветра, перспективным является использование ветроэнергетических установок, основные конструктивные элементы которых изготавливаются из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Наиболее опасным эксплуатационным дефектом ПКМ являются ударные повреждения: из-за ударов града или кусков льда оторвавшихся при обогреве лопастей, а также при ударе молнии. Такие дефекты, трудно обнаруживаемые при визуальном осмотре, могут существенно снижать прочность и ресурс конструкции. На этапах отработки технологии и сертификации конструкции требуется применение современных методов неразрушающего контроля. ЦЕЛЬ. Оценить возможности рентгеновской компьютерной томографии для диагностики элементов конструкций из ПКМ с ударным повреждением. МЕТОДЫ. После нанесения низкоскоростного удара на фрагменты лопастей ветрогенератора проводится визуальный осмотр и измерение размеров внутренних повреждений на рентгеновском компьютерном томографе Phoenix V |Tome| X. РЕЗУЛЬТАТЫ. Исследован характер повреждений, нанесенных с различной энергией удара по наиболее критическим местам фрагментов лопастей аэродинамического профиля и стрингерной панели. Определена глубина и площадь повреждения. Изучен характер и размеры внутренних повреждений с применением рентгеновского компьютерного томографа. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Полученные результаты позволяют оценить с высокой точностью размеры и расположение ударных повреждений, которые можно использовать в прочностных расчетах.

Ключевые слова: лопасти ветрогенераторов; композиционные материал; неразрушающий контроль; рентгеновская компьютерная томография; объект контроля.

Благодарности: Работа, выполнена в рамках соглашения Минобрнауки №075–02–2021–1546 от 22 июня 2021г. в целях реализации мероприятий международного сотрудничества с Российско-Вьетнамским тропическим научно-исследовательским и технологическим центром. Методика исследования разработана и выполнена при финансовой поддержке, выделяемой Казанскому федеральному университету по государственному заданию в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2023–0009.

Для цитирования: Кротова Е.В., Саченков О.А., Митряйкин В.И., Зайцева Т.А., Закиров Р.Х. Применение рентгеновской компьютерной томографии для диагностики

композитных конструкций в энергетике // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 15-31. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-15-31.

THE USE OF X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY FOR THE DIAGNOSIS OF COMPOSITE STRUCTURES IN THE ENERGY SECTOR

Krotova¹ E.V., Sachenkov² O.A., Krotova¹ E.V., Mitryakin¹ V.I.,
Zaitseva¹ T.A., Zakirov³ R.H.

¹Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI,
Kazan, Russia

²Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

³ GAU "Republican Clinical Infectious Diseases Hospital named after Professor
A.F.Agafonov", Kazan, Russia
tanechkaGA@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE* In modern Russia, an important condition for the development of the Far North and Far Eastern regions is to provide these regions with electricity. In remote areas with increased wind potential, the use of wind power plants, the main structural elements of which are made of polymer composite materials (PCM), is promising. The most dangerous operational defect of the PCM is shock damage: due to hail strikes or pieces of ice that broke off during heating of the blades, as well as lightning strikes. Such defects, which are difficult to detect during visual inspection, can significantly reduce the strength and service life of the structure. At the stages of technology development and design certification, the use of modern methods of non-destructive testing is required. *PURPOSE.* To evaluate the possibilities of X-ray computed tomography for the diagnosis of structural elements made of PCM with impact damage. *METHODS.* After applying a low-speed impact to fragments of the blades of the wind turbine, a visual inspection and measurement of the size of internal injuries are carried out on a Phoenix V |Tome|X X-ray computed tomograph. *RESULTS* The nature of the damage inflicted with different impact energies on the most critical areas of fragments of the airfoil blades and the stringer panel is investigated. The depth and area of damage have been determined. The nature and size of internal injuries were studied using an X-ray *COMPUTED* tomograph. *conclusion.* The results obtained allow us to estimate with high accuracy the size and location of impact damage, which can be used in strength calculations.

Keywords: blades of wind turbines; composite materials; non-destructive testing; X-ray computed tomography; object of control.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the agreement of the Ministry of Education and Science No. 075-02-2021-1546 dated June 22, 2021 in order to implement international cooperation activities with the Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center. The research methodology was developed and implemented with financial support provided to Kazan Federal University under the state assignment in the field of scientific activity, project no. FZSM-2023–0009.

For citation: Krotova E.V., Sachenkov O.A., Krotova E.V., Mitryakin V.I., Zaitseva T.A., Zakirov R.H. The use of X-Ray computed tomography for the diagnosis of composite structures in the energy sector. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (2): 15-31. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-15-31.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

Вопросами развития Крайнего Севера и дальневосточных регионов России со сложными природными условиями уделяется особое внимание. Осуществляются программы развития Дальнего Востока и Северного морского пути, совершенствованию транспортной инфраструктуре, и обеспечению электроэнергией этих регионов [1]. В программе развития «зеленой» энергетики в России на 2025–2035 гг. разработан механизм поддержки производства, генерирующего оборудования на основе

возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) с целью создания самих генерирующих объектов и полноценного научно-производственного комплекса, связанного с разработкой, внедрением, опытным и серийным производством компонентов энергетического оборудования для ВИЭ, включая ветрогенераторы.

В настоящее время налажено производство различных видов российских ветрогенераторов. Например, в Ульяновской области на заводе «Вестос» создано производство стеклопластиковых лопастей длиной более 60 метров по технологии вакуумной инфузии. Предприятие *Mahaon-energy* производит ветрогенераторы, которые относятся к категории вертикального оборудования. Один из ветрогенераторов «Махаон» показан на рисунке 1, другой тип ветрогенератора производства ЗАО Ветроэнергетической компании показан на рисунке 2.



Рис.1. Ветрогенератор «Махаон»

Fig.1. Wind generator «Mahon»

**Источник: составлено автором*



Рис.2 Ветрогенератор ЗАО «Ветроэнергетическая компания»

Fig.2. Wind turbine generator of CJSC Wind Energy Company

Source: compiled by the author

Лопастей являются наиболее важными элементами ветрогенераторов, они предназначены для создания крутящего момента на валу ветрогенератора, посредством воздействия на лопасть давления, создаваемого ветровым потоком и аэродинамической составляющей. Конструкции лопастей для различных ветрогенераторов отличаются между собой. Внешний корпус лопасти должен иметь аэродинамический профиль. У некоторых лопастей это достигается применением в конструкции лонжерона и обшивки хвостовой секции, внутри которой может быть пенопласт или сотовый наполнитель. Другой тип лопастей пустотелый внутри. Для восприятия осевых усилий растяжения и сжатия устанавливаются специальные профильные элементы силового набора – стрингеры, связанные с обшивкой. Они приформовываются к обшивке образуя Т-образную зону склейки. Такую конструкцию имеет лопасть ЛВТ-Н7 ветрогенератора «Махаон» (рис.1). Крепление этой лопасти осуществляется за счет болтов, вставленных в отверстия с использованием специальных профильных пластин. Лопасти как правило изготавливаются из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Применение ПКМ в конструкциях лопастей, электрогенераторов решает ряд задач, связанных с уменьшением массы агрегатов, стойкости к различным погодным и климатическим факторами, которые влияют на ресурс установки. Системный анализ влияния климата на механические свойства ПКМ проведен в работах [2-3].

Зачастую при изготовлении лопасти в качестве армирующего материала применяется стекловолокно, однако в настоящее время идет разработка технологии изготовления данной конструкции из углеродного волокна. Углепластики обладают повышенными эксплуатационными характеристиками, повышенной жесткостью и удельной прочностью. В работе [4] показано, что применение углеволокна в строительстве и конструкции ветровых установок приводит к уменьшению веса конструкции, а также повышается прочность и долговечность электростанций, обеспечивает защиту от обледенения.

Современные технологии производства ПКМ не гарантируют отсутствия в изделиях дефектов, снижающих их качество, что приводит к значительному рассеиванию значений физико-механических характеристик изделий из ПКМ. К технологическим дефектам относятся повышенная пористость, трещины, расслоения. Помимо производственных дефектов в процессе эксплуатации готовых изделий могут

образовываться эксплуатационные дефекты. Наиболее опасным эксплуатационными дефектами ПКМ является ударные повреждения - из-за ударов града или кусков льда оторвавшихся при обогреве лопастей, а также при ударе молнии. Такие дефекты трудно обнаруживаемы при визуальном осмотре, но при этом они могут существенно снижать прочность конструкции [5-8]. Обеспечение качества изделий из ПКМ требует разработки современных методов и средств неразрушающего контроля [9-11].

Для диагностики конструкций из полимерных композиционных материалов применяются следующие методы неразрушающего контроля, созданные на разных физических принципах: акустические методы основаны на взаимодействии с контролируемым изделием упругих колебаний и волн широкого диапазона частот; голографический метод использует формирование голограмм объекта и анализ голографических картин бездефектного и дефектного объекта; тепловые методы основаны на взаимодействии теплового поля объекта с термометрическими чувствительными элементами, преобразовании параметров поля в параметры электрического или другого сигнала и передаче его на регистрирующий прибор; шерография – использует регистрацию интерференционных изображений локальных перемещений поверхности объекта контроля до и после приложения внешнего возмущающего воздействия; радиационные методы основаны на различиях поглощения материалами рентгеновских лучей. Они широко применяются для обнаружения пустот, пористости, инородных включений, дефектов сотовых блоков.

Эти методы имеют свои достоинства и недостатки, главным критерием их применения являются геометрические, конструктивные и другие характеристики конструкции.

Одним из современных методов неразрушающего контроля композитных материалов является рентгеновская компьютерная томография (РКТ) [12-15]. Суть метода заключается в реконструкции отдельного сечения исследуемого объекта по проекционным данным, полученным при просвечивании объекта рентгеновскими лучами в различных направлениях и путем измерения энергии прошедшего излучения вдоль каждого из них. Реконструируемой в плоскости сечения физической величиной является коэффициент ослабления рентгеновского излучения, который зависит от плотности материала и элементов состава материала, более плотные материалы, будут отображаться более яркими участками, а менее плотные будут отображаться более затемненными участками. Таким образом, может быть получено изображение в так называемой серой шкале, где белым будут отображаться наиболее плотные структуры, а черным - структуры, имеющие меньшую плотность.

Цель исследования заключается в оценке возможностей рентгеновской компьютерной томографии для диагностики элементов конструкций ветрогенераторов с эксплуатационными и технологическими дефектами.

Научная значимость исследований заключается в разработке эффективного подхода, позволяющего совместить данные средств неразрушающего контроля (в частности рентгеновской компьютерной томографии (РКТ)) и вычислительные методы оценки напряженно-деформированного состояния. При таком подходе данные РКТ принимаются как цифровой прототип реального изделия, который содержит в себе информацию не только о распределении материала по объему изделия, но и данные о локальных дефектах.

Практическая значимость исследований заключается во внедрении РКТ для анализа состояния конструкций после ударного воздействия на различные области **лопасти**, что позволило точно определить характер повреждений, найти точное их расположение и определить размеры.

Материалы и методы (Materials and methods)

В качестве объекта исследования были выбраны фрагменты лопасти аналогичные по структуре лопастям ветрогенераторов. Первый состоит из лонжерона и хвостовой секции, в которой между двумя стеклопластиковыми обшивками находится сотовый наполнитель (рис.3). Второй фрагмент состоял из углепластиновой обшивки и прикрепленных к ней стрингеров (рис.4).

Для нанесения удара у первого фрагмента были выбраны 4 зоны, схематично представленные на рисунке 3. Первая область удара находится в зоне лонжерона, изготовленного из многослойного стеклопластика; вторая - в зоне соединения обшивки и лонжерона; третья зона находится в средней части в месте обшивки и сотового наполнителя, четвертая – в хвостовике лопасти. Удар по стрингерной панели наносился в зоне подкрепления обшивки стрингером.

Методика ударных испытаний фрагментов лопастей (Рис.2) разрабатывалась в соответствии с требованиями международных стандартов определения стойкости к разрушению при ударных нагрузках (ГОСТ Р 56684–2015, ASTM D7766). Удар наносился с помощью копра *Instron «Dynatup - 9250 HV»* (рис. 5 (а)) наконечником диаметром $d=16$ мм.

Крепление образца осуществлялось механическими прижимами. Общий вид лопасти, установленной в испытательную оснастку, показан на рисунке 5 (б). Для каждой зоны был выбран различный диапазон энергий воздействия, с учетом характера разрушения материала.

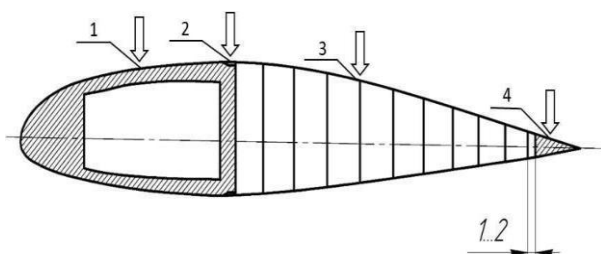


Рис. 3. Фрагмент лопасти

Fig.3. Blade fragment

*Источник: составлено автором

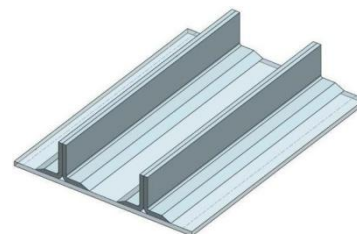


Рис. 4. Стрингерная панель

Fig.4. Stringer panel

Source: compiled by the author

Обработка данных удара производилась при помощи программного обеспечения "IMPULSE". Определялась энергия удара G (Дж) и максимальная ударная нагрузка P_m (Н).



а

Рис.5. а - общий вид ударной установки Instron Dynatup 9250 HV, б - фрагмента лопасти в испытательной оснастке

*Источник: составлено автором.



б

Fig.5. а- general view of Instron Dynatup 9250 HV impactor, б- blade fragment in test fixture

Source: compiled by the author

После нанесения удара проводился визуальный контроль повреждений, а также измерение геометрических их характеристик в каждой зоне. Глубина повреждений δ измерялась микрометром с цифровой индикаторной головкой Mitutoyo ID-C112 с разрешением 0,001 мм (Рис. 6). Измерения площади повреждений S проводилось при помощи анализа графических снимков на специализированном программном обеспечении персонального компьютера Corel DRAW с соблюдением масштаба съемки (Рис.7).



Рис.6. Замер глубины повреждения

Fig.6. Measuring the depth of damage

*Источник: составлено автором.

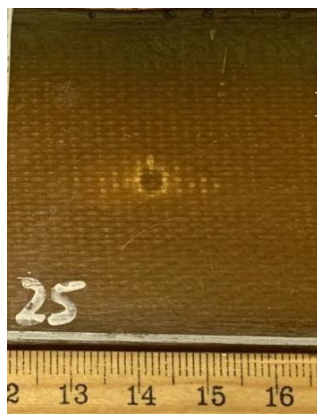


Рис.7. Нахождение площади повреждения

Fig.7. Finding the area of damage

Source: compiled by the author

Результаты (Results)

В настоящее время для обеспечения безопасной эксплуатации композиционных конструкций с повреждениями сформулирован критерий пороговых характеристик ударного воздействия «размер повреждения – энергия удара». К качеству меры обнаружения повреждений в ПКМ обычно применяется глубина вмятины. Помимо глубины, вмятина характеризуется и другими размерами-длиной, шириной и площадью. На размер и форму дефекта влияет скорость соударения, энергия удара, площадь контактирующей поверхности при ударе и т. д. Для обеспечения безопасной конструкции дефект не должен снижать прочность ниже расчетных значений. Для проведения таких расчетов необходимо знать размеры повреждений, определенных визуально, а для более точной оценки, с применением неразрушающих методов контроля. Далее приведены результаты такой оценки размеров повреждений фрагментов лопастей ветрогенераторов. На рисунках 8–9 показан характер ударных повреждений фрагмента лопасти несущего винта в различных зонах. Визуальный анализ образца показал, что характер повреждения материала различен для каждой зоны нанесения удара. Из визуального анализа видно, что помимо уплотнения материала в месте контакта бойка, вокруг вмятины произошло побеление материала, что говорит о разрыве волокон в ткани.

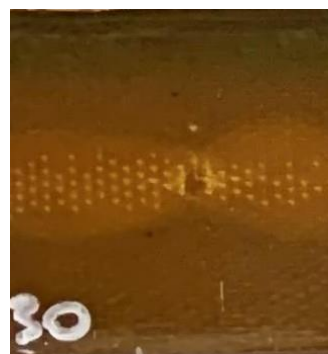


Рис.8. Характер ударных повреждений по фрагменту лопасти в зоне лонжерона при различных энергиях удара

*Источник: составлено автором.

Fig.8. Character of impact damage on the blade fragment in the spar zone at different impact energies

Source: compiled by the author

В таблице 1 представлены результаты измерения глубины вмятины и площадей повреждений зоны лонжерона в зависимости от энергии удара. Аппроксимирующие зависимости, позволяющие оценить влияние энергии удара на размеры повреждений в зоне сот показаны на рисунке 10-11.

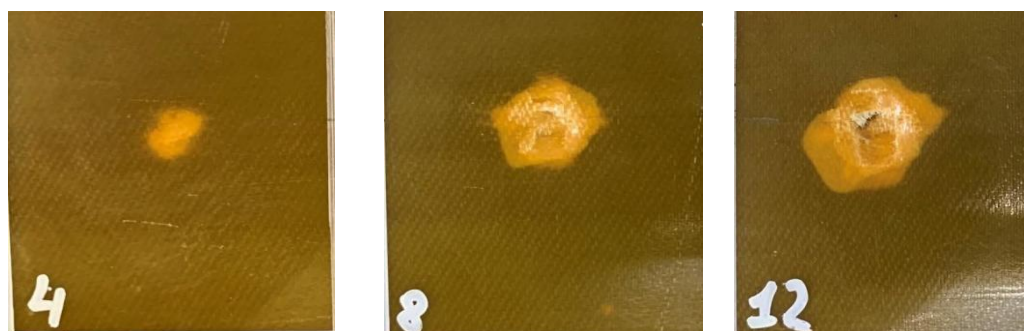


Рис. 9. Характер ударных повреждений по фрагменту лопасти в зоне обшивки при различных энергиях удара

*Источник: составлено автором.

Fig.9. Character of impact damage on the blade fragment in the cladding zone at different impact energies

Source: compiled by the author

Таблица 1

Table 1

Результаты измерения глубины вмятины и площадей повреждений зоны лонжерона в зависимости от энергии удара

Results of measuring the dent depth and damage areas of the spar zone depending on the impact energy

Энергия удара, Дж	Глубина вмятины, мм	Площадь повреждения, мм ²	Энергия удара, Дж	Глубина вмятины, мм	Площадь повреждения, мм ²
5	0,049	6,326	30	0,274	251,264
5	0,028	11,556	30	0,304	309,208
10	0,034	25,476	35	0,457	397,924
10	0,052	57,470	35	0,521	435,920
15	0,146	29,258	40	0,312	458,774
15	0,107	31,017	40	0,424	441,328
20	0,154	75,342	45	0,453	435,767
20	0,159	73,590	45	0,368	495,625
25	0,21	120,386	50	0,257	514,145
25	0,164	105,933	50	0,301	537,544

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

Неразрушающий контроль образцов с повреждениями проведен методом рентгеновской компьютерной томографии. Данный метод позволяет визуализировать внутреннюю структуру изделий посредством обработки теневых проекций, полученных при рентгеновском просвечивании объекта.

Послойный анализ повреждений проводился с использованием системы промышленной микро- томографии *Phoenix V|Tome|X S240*. Данная система оснащена двумя рентгеновским трубками – микро- фокусной с максимальным ускоряющим напряжением 240 кВ и мощностью 320 Вт и нанофокусной с максимальным ускоряющим напряжением 180кВ и мощностью 15 Вт. Данная система предназначена для проведения расширенного двухмерного рентгеновского контроля и анализа, проведения двухмерной съемки для формирования 3D-модели, создания объемной 3D-модели для внутренней дефектоскопии, 3D-сканирования внешних и внутренних поверхностей, проведения различных геометрических измерений и анализа.

Принцип действия рентгеновской компьютерной томографии заключается в проведении рентгенографического анализа исследуемого образца, устанавливаемого между рентгеновской трубкой и детектором. Образец просвечивается постоянным рентгеновским излучением с характеристиками, задаваемыми оператором через компьютер. Рентгеновская проекция образца фиксируется цифровым панельным детектором и в реальном времени отображается на экране монитора. Манипулятор имеет возможность перемещения образца, трубки и детектора для обеспечения необходимого положения объекта с оптимальным увеличением. Сбор данных для построения томограмм осуществляется поворотом образца на 360° с заданным шагом с помощью поворотного стола.

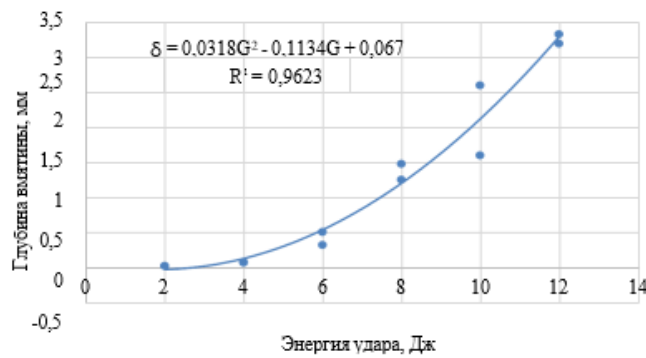


Рис.10. Зависимость глубины повреждения в зоне сот от энергии удара Fig.10. Dependence of damage depth in the honeycomb zone on impact energy

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

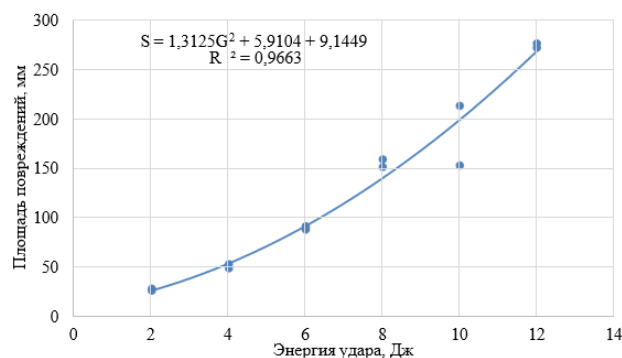


Рис.11. Зависимость площади повреждения в зоне сот от энергии удара Fig.11. Dependence of the damage area in the honeycomb zone on the impact energy

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

Для анализа внутренней структуры и области повреждения фрагмента лопасти методом компьютерной томографии был подготовлен образец, включающий зоны удара каждого представленного типа. На рисунках 12–15 представлены результаты микротомографических исследований фрагмента лопасти в различных зонах. Томограммы повреждений стрингерной панели показано на рисунках 16–17.

В ходе эксперимента на томографе был установлен характер изменения внутреннего пространства по толщине образцов. Полученные данные позволили определить размеры повреждения образца. Размеры визуальной регистрируемой вмятины на поверхности значительно меньше зоны разрушения внутри образца, где наблюдается разрушение волокон, повреждение волокон с расслоениями, расслоения без повреждения волокон. Все эти повреждения изменяют структуру материала, повышают пористость в зоне повреждения, что снижает значения механических характеристик.

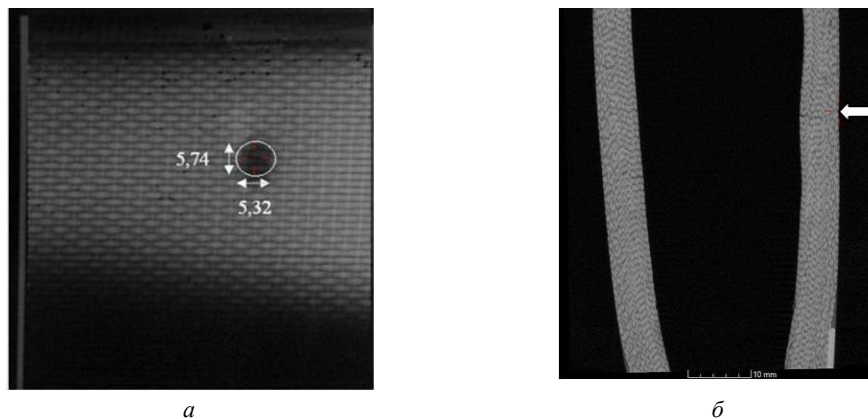
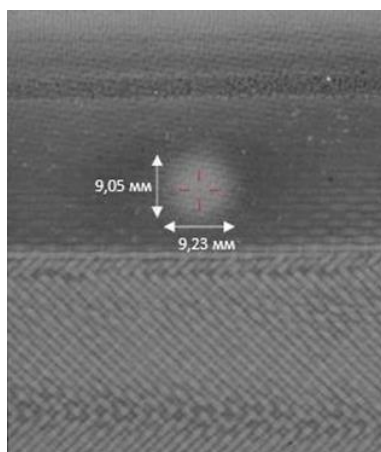


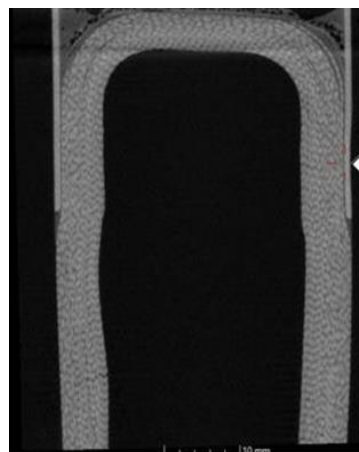
Рис. 12. Томограммы лонжерона в а) продольном сечении б) поперечном сечении расстояние от поверхности удара 0,5 мм Fig.12 Tomograms of the spar in a) longitudinal section b) cross-section the distance from the impact surface is 0.5 mm

*Источник: составлено автором

Source: compiled by the author



а



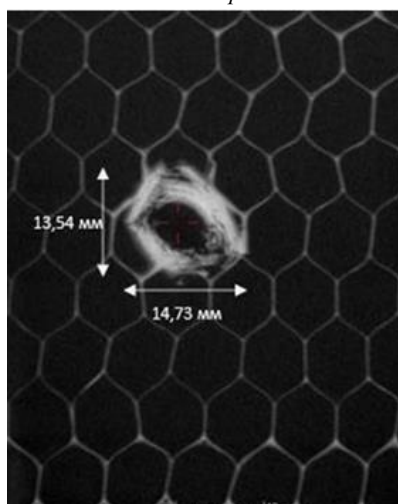
б

Рис.13. Томограммы соединения обшивки лонжерона в а) продольном сечении б) поперечном сечении расстояние от поверхности удара 1 мм

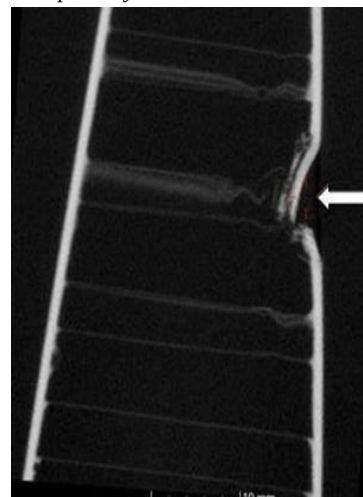
*Источник: составлено автором

Fig.13. Tomograms of the skin and spar connection in a) longitudinal section б) cross-section the distance from the impact surface is 1 mm

Source: compiled by the author



а



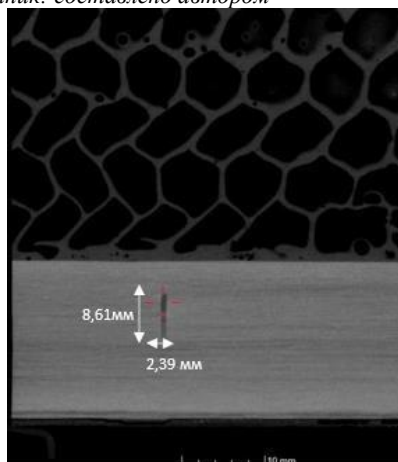
б

Рис. 14. Томограммы места обшивки и сотового заполнителя в а) продольном сечении б) поперечном сечении расстояние от поверхности удара 1 мм

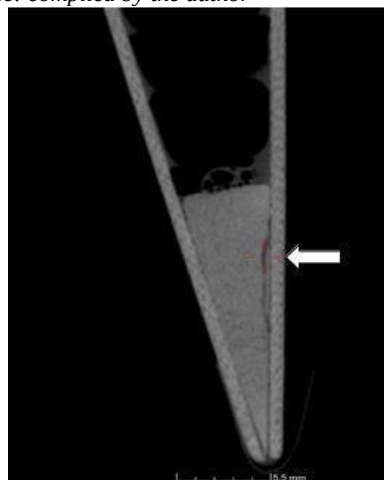
*Источник: составлено автором

Fig.14. Tomograms of the place of cladding and cellular filler in a) longitudinal section б) cross-section the distance from the impact surface is 1 mm

Source: compiled by the author



а



б

Рис. 15. Томограммы хвостика в а) продольном сечении б) поперечном сечении расстояние от поверхности удара 0,8 мм

*Источник: составлено автором

Fig.15. Tomograms of the tail in a) longitudinal section б) cross-section the distance from the impact surface is 0.8 mm

Source: compiled by the author

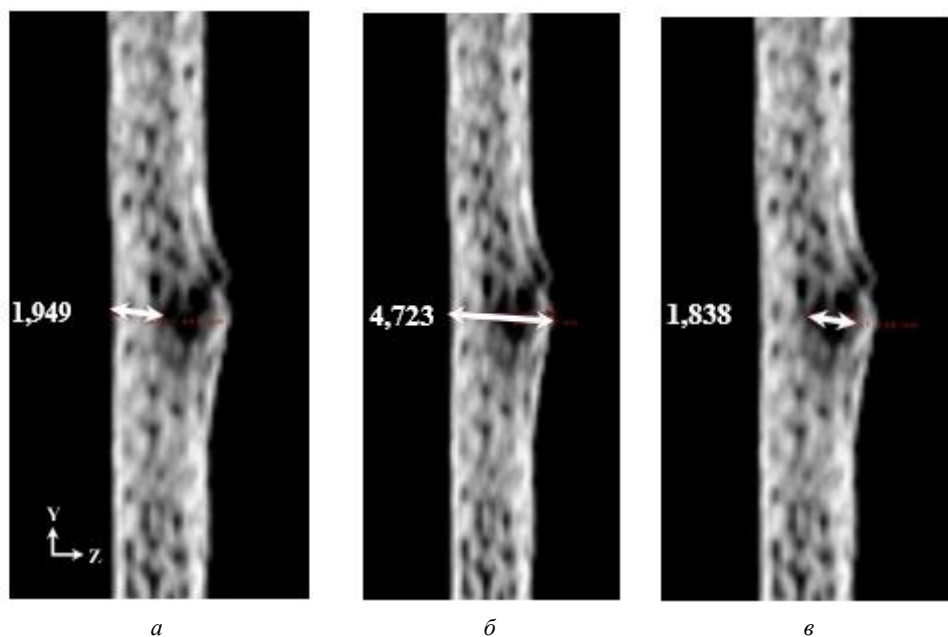


Рис.16. Томограммы повреждений обшивки стрингерной панели

*Источник: составлено автором

Fig.16. Tomograms of damage to the lining of the stringer panel

Source: compiled by the author

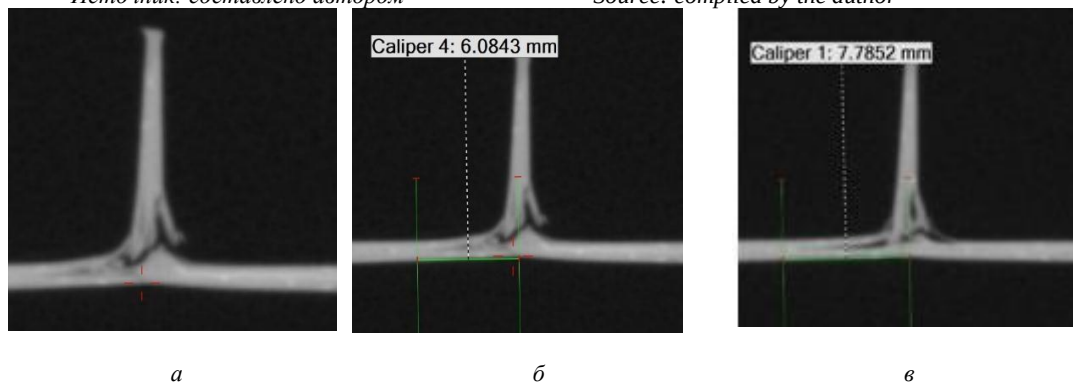


Рис.17. Томограммы повреждений стрингера

*Источник: составлено автором

Fig.17. Tomograms of stringer injuries

Source: compiled by the author

Еще одним объектом исследования было металлокомпозитное соединение подобное креплению лопасти ЛВТ-47 ветрогенератора «Махаон». Оно осуществляется с помощью болта, проходящего в сквозные отверстия обшивки и закрепленного профильными пластинами. На ресурс этого соединения могут влиять технологические дефекты и климатические факторы, которые снижают механические характеристики обшивки.

При экспериментальной отработке новых композиционных материалов в целях определения сопротивления деформированию элементов конструкций с наличием концентраторов напряжений. Проводят испытания образца в виде пластины с отверстием. Пластина одним краем жестко закреплена, на другом крае в отверстие вставлен цилиндрический стержень, к которому приложена нагрузка (рис. 18). При определенной нагрузке P пластина начинает деформироваться-возникает эффект овализации отверстия. При этом происходит смятие пластины или разрушение, если разрушение не наступает ранее. В процессе испытания записывают диаграмму деформирования «напряжение смятия-деформация смятия (овализация отверстия)» (рис. 19). Диаграмма деформирования является характеристикой материала в составе конструкции и характеризует сопротивляемость материала воздействию нагрузок в зоне концентраторов напряжений, главным образом соединительных элементов конструкций.

Наряду с визуальным контролем внутренних дефектов, композитных конструкций, рентгеновская компьютерная томография позволяет проводить количественную оценку структуры материала. При обследовании объекта создается 3D модель образца со значениями коэффициента ослабления рентгеновского излучения μ , который зависит от плотности материала.

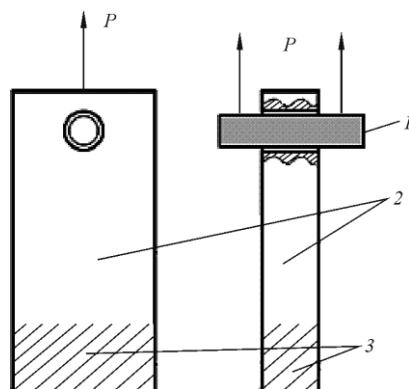


Рис.18. Схема проведения испытания и вид образца при испытании на смятие

Fig.18. The scheme of the test and the type of sample during the crumple test

*Источник: составлено автором



Рис.19. Испытание образцов

Fig.19. Testing of samples

Source: compiled by the author

В свою очередь линейное ослабление изучаемого материала удобно нормировать относительно коэффициента ослабления дистиллированной воды и воздуха. Такая нормировка называется шкалой Хаунсфильда (HU). Значение HU для исследуемого материала вычисляется по известному выражению:

$$HU = 1000 \frac{\mu_x - \mu_W}{\mu_W - \mu_A}, \quad (1)$$

где μ_W - линейный коэффициент ослабления воды; μ_A - линейный коэффициент ослабления воздуха; μ_x - линейный коэффициент ослабления исследуемого материала в заданной точке x.

При отображении данных КТ чаще всего величины шкалы Хаунсфильда в точке отображают градиентом серого. Из множества эмпирических исследований были выявлены некоторые зависимости между числами Хаунсфильда и оптической плотностью, упругими константами, предельным напряжением. Данные зависимости можно в общем виде можно записать следующим образом [16]:

$$\rho = a_\rho + b_\rho HU, \quad (2)$$

$$E = a_E \rho^{b_E}, \quad (3)$$

$$\sigma_{KP} = a_\sigma \rho^{b_\sigma} \quad (4)$$

где коэффициенты a , b с соответствующими индексами определяется из эксперимента, ρ -плотность, E -модуль упругости, $\sigma_{кр}$ -предел прочности при сжатии.

Зависимость (2) устанавливается линейную связь оптической и физической плотностей. В то время как зависимости (3), (4) экспоненциально связывают модуль Юнга материала и его локальную прочность с физической плотностью. Таким образом, данные томографии позволяют определить распределение механических свойств материала по объему изделия. А это позволяет использовать данные КТ в роли цифрового двойника вычислительной модели [17,18]. Классические подходы подразумевают сегментацию данных КТ и последующее восстановление тел [18,19], после чего строится численная модель, чаще всего на основе метода конечных элементов [20]. Численная модель позволяет оценить напряженно-деформированное состояние с учетом данных КТ. Но процесс восстановления тел по данным томографии является трудоемким и наиболее протяженным по времени. Непосредственное же сравнение значений HU для эталонного и исследуемого образца позволяет сделать выводы о наличии или отсутствии дефектов [21]. Трудоемкость этого процесса можно снизить, если использовать данные распределений чисел Хаунсфильда

по объему томографии. Тогда, при помощи, гистограмм, можно выявлять отклонения исследуемого образца от эталонного.

Так, при испытании партии пластин с отверстиями углепластика на смятие (рис 19) было обнаружено снижение прочностных характеристик у отдельных образцов. Проверка неразрушенных образцов на рентгеновском компьютерном томографе Gender CB-500 (США) показала нарушение внутренней структуры у некоторых образцов. Результаты такого контроля показаны на рисунке 20.

На рисунке 20 слева приведена гистограмма распределения значений HU в материале. На гистограмме явным образом выделяются два пика, каждый из которых отвечает за материал определенной плотности. Большой пик соответствует средним значениям равным 400 HU, что соответствует эталонным значениям для данного материала. Второй пик со значениями 200 HU показывает, что часть материала в пластине имеет пониженную плотность, эти значения можно трактовать как наличие дефекта. Визуальный контроль томограмм показал, что области с пониженной плотностью расположены по бокам отверстия (Рис.20). Найденные значения HU были по формулам (2) и (3) пересчитаны в модули Юнга для эталонного E_1 , и дефектного материала E_2 .

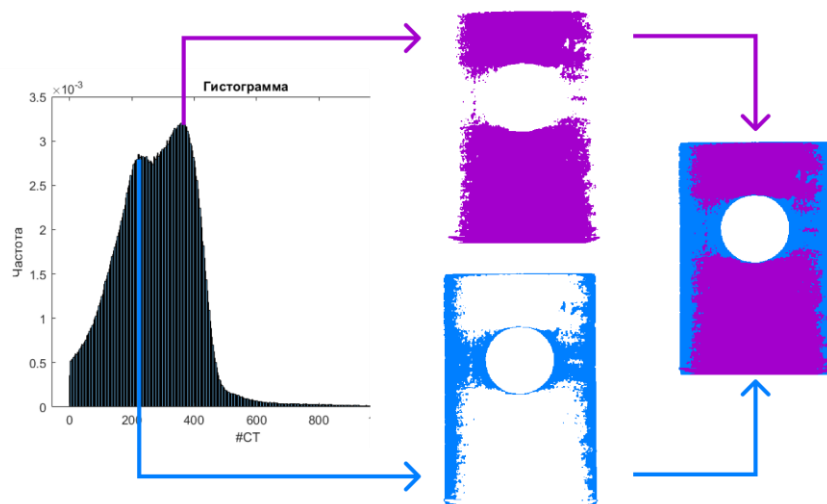


Рис.20.Результаты диагностики образца на рентгеновском компьютерном томографе

Fig.20. The results of the diagnosis of the sample on an X-ray computed tomograph

*Источник: составлено автором

Source: compiled by the author

Затем, была построена численная параметрическая модель образца. Задача решалась при помощи метода конечных элементов в программе Ansys, для вычислений использовался восьми узловой конечный элемент с квадратичной аппроксимацией в плосконапряженной постановке.

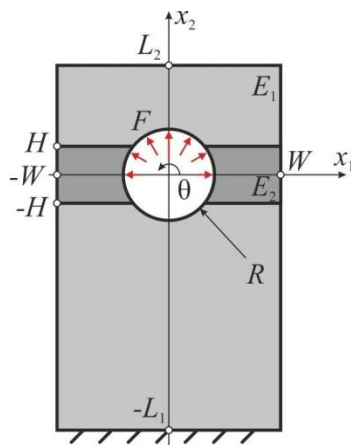
Очевидно, что влияние на несущую способность изделия влияет и геометрия распределения плотностей. Из технологических соображений в первом приближении можно предположить, что область дефекта представляет собой полосу (выделено темным цветом на рис. 21) шириной 2Н. В расчетах нижний торец жестко закреплялся, а к верхней полуокружности выреза прикладывалась нагрузка. Расчетная схема напряжения пластины и расчетная сетка в области отверстия показаны на рисунке 21.

После определения поля напряжений по формулам (2), (4) рассчитывались предельные напряжения, и производился пересчет результатов в коэффициенты запаса прочности. Распределенные коэффициенты запаса прочности в эталонной и дефектной пластине показаны на рисунке 22.

Наибольшие значения коэффициента запаса прочности были локализованы по краям отверстия, что согласуется с известным решением. В случае наличия неоднородности локализация максимальных напряжений сохраняется, но растет величина коэффициентов запаса прочности.

Так, численные результаты позволили показать, что снижение оптической плотности на 10% при относительной толщине полосы с дефектом в 10% в области выреза повышают величину коэффициента запаса с 0,9 до 1,1. Но при увеличении ширины полосы с дефектом коэффициент запаса начинает снижаться, когда ширина становится соизмерима

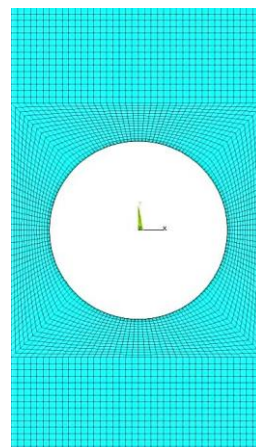
с диаметром отверстия. Что может быть объяснено, тем, что в области отверстия материал становится однородным, но с другими свойствами.



а

Рис.21 Расчетная схема нагружения пластины с:
а) круговым вырезом, б) расчетная сетка в области
выреза

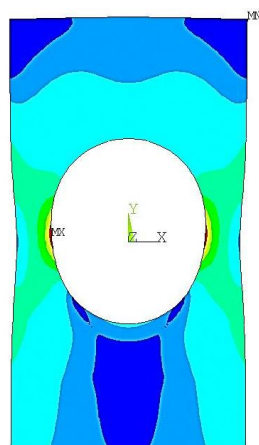
*Источник: составлено автором



б

Fig.21. Calculation scheme of plate loading
with: а) circular cutout, б) the calculated grid
in the cutout area

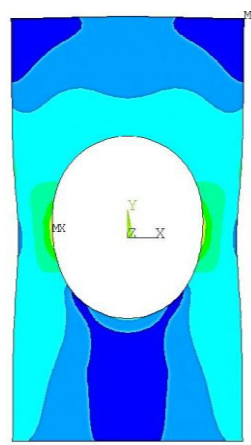
Source: compiled by the author



а

Рис.22. Картинка распределения коэффициента
запаса прочности: а) дефектная пластина, б)
эталонная пластина

*Источник: составлено автором



б

Fig.22. A picture of the distribution of the safety
factor: а) defective plate, б) reference plate

Source: compiled by the author

Поэтому можно отметить, что с точки зрения несущей способности опасными становятся случаи, когда дефект по ширине порядка 20% диаметра отверстия, так как тогда концентрация напряжений от внешней нагрузки суммируется с концентрацией напряжений от локального снижения механических свойств материала.

Заключение (Conclusions)

В работе показаны возможности РКТ для неразрушающего контроля различных композиционных деталей ветрогенераторов на этапах обработки и сертификационных испытаниях конструктивно-подобных образцов. Проведено нанесение ударных повреждений на фрагменты лопастей ветрогенераторов, с использованием ударного стенда. С применением рентгеновской компьютерной томографии изучен характер повреждений, установлена взаимосвязь между размерами разрушений и энергией удара, установлены размеры (границы) повреждений при визуальном и неразрушающем контроле. Полученные результаты можно использовать при проведении прочностных расчетных конструкций с повреждениями и при разработке технологических решений по оперативному ремонту. Рассмотрена задача об оценке прочности элемента крепления лопасти ветрогенератора состоящего из пластины с отверстием и металлического стержня, к которому прикладывалась нагрузка, растягивающая пластину через отверстие. Предварительно, перед

испытанием на растяжение пластина была исследована на рентгеновском компьютерном томографе и у нее было обнаружено наличие зон с пониженной плотностью.

Применено программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс обнаружения дефектов путем анализа результатов измерений коэффициентов ослабления рентгеновского облучения. С использованием известных эмпирических соотношений установлена взаимосвязь между коэффициентами ослабления и механическими характеристиками материала. Проведен расчет напряженно-деформированного состояния пластин с найденными повреждениями. Такой подход позволяет прогнозировать прочность конструкций на этапе ее контроля на РКТ.

Литература

- 1.Национальная программа развития Дальнего Востока: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2020 года № 2464-р. URL: <http://www.government.ru/docs/40487>.
- 2.Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников//Авиационные материалы и технологии.2018. №2 (51).С.47-50.
- 3.Евдокимов А.А., Петрова А.П., Павловский К.А., Гуляев И.Н. Влияние климатического старения на свойства ПКМ на основе эпоксисилвинилэфирного связующего. Труды ВИАМ, №3(97) 2021, с.128-131.
- 4.Г.Э.Окольников, Д.А.Бронников, Н.И.Щедрин. Использование углеродного волокна в конструкциях ветровых электростанций. -Системные технологии. - 2018.-№27.-С.60-63.
- 5.Victor I. Mityaykin; Tatiana A. Zaitseva; Oleg N. Bezzametov; Mikhail E. Kuznetsov. Effect of Impact Damages on the Strength of Wind Turbine Blade. 023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) | 979-8-3503-9952-3/23/\$31.00 ©2023 IEEE | DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086749
- 6.K.T.Tan, N.Watanabe, Y.Iwahori. Finite element model for compression after impact behavior of stitched composites/Composites. Part B: engineering Vol.79. 2015, pp 53-60.
- 7.Mocanu C., Pohilca A., Moise L., Tudose D. Comparative Studies on the Behaviour of Flat Panels Made of GRP Under Static and Dynamic Loads. Materiale Plastice, 2021, Vol. 58, No. 4, pp. 222-237. doi: 10.37358/MP.21.4.5548
- 8.Zhang Y., Zheng J., Shen F., Han W., Munstermann S., Shou H., Liu Q. Analysis of local stress/strain fields in an HPDC AM60 plate containing pores with various characteristics. Engineering Failure Analysis. 2021, Vol. 127, pp. 105503. doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105503
- 9.Котовщиков И.О. Современные мобильные системы неразрушающего контроля изделий из композитных материалов// Композитный мир.2018, №6 (81), с.54-56.
10. Шулайкин А.Ю, Попов М.А., Ковалев В.А., Иванов А.В., Артамонов Ю.С, Шурыгин А.Е. Современные методы диагностики объектов из композиционных материалов// Современная техника и технологии. 2016. №4.
11. Celko L., Gutierrez-Cano V., Casas-Luna M., Matula J., Oliver-Urrutia C., Remesova M., Dvorak K., Zikmund T., Kaiser J., Montufar E.B. Characterization of porosity and hollow defects in ceramic objects built by extrusion additive manufacturing. Additive Manufacturing, 2021, No. 47, pp. 1-12. doi: 10.1016/j.addma.2021.102272
12. Вайберг Э.И. Контроль изделий из композиционных материалов методом рентгеновской вычислительной томографии- Дефектоскопия, 1984, №10, с.32-35.
13. Sneha Samal, Mareeta Kolinova, Hubert Rahier, Giovanni Dal Poggetto and Ignazio Blanco Investigation of the Internal Structure of Fiber Reinforced Geopolymer Composite under Mechanical Impact:A Micro Computed Tomography Study//Applied Sciences. Vol.9. Issue 3.2019.p.516.
14. Герасимов О. В., Рахматулин Р.Р., Балтина Т.В., Саченков О.А. Определение напряженно-деформированного состояния костей по данным компьютерной томографии // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 8 (761). С. 3–15.
15. Акифьев К.Н., Стаценко Е. О., Смирнова В. В., Харин Н.В., Большаков П.В., Саченков О.А. Методика исследования пористости образцов с жидкостью рентгеновским компьютерным томографом при одноосном сжатии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2023. № 2. С. 11–21.
16. Компьютерный томографический контроль механических характеристик композитных и биологических материалов на основе метода аналогии плотностей по шкале Хаунсфилда: диссертация ... кандидата технических наук: 05.11.13 / Зайцева Татьяна Александровна; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева - КАИ»]. - Казань, 2020. - 139 с.: ил.
17. Саченков О. А., Герасимов О. В., Королева Е. В., Мухин Д. А., Яикова В.В., Ахтямов И.Ф.,

Шакирова Ф.В., Коробейникова Д.А., Чжи К.К. Построение неоднородной конечно-элементной модели по данным компьютерной томографии. Российский журнал биомеханики, 2018, Т.22, №3, с.290-302, doi: 1015593/RJBiomeh/2018.3.05.

18. Silva-Henao J., Synek A., Pahr D.H., Reisinger A.G. Selection of animal bone surrogate samples for orthopaedic screw testing based on human radius CT-derived bone morphology. Med. Eng. Phys., 2022, vol. 103, pp. 103786. DOI: 10.1016/j.medengphy.2022.103786

19. Kieser D.C., Kanade S., Waddell N.J., Kieser J.A., Theis J.-C., Swain M.V. The deer femur — A morphological and biomechanical animal model of the human femur. Biomed. Mater. Eng., 2014, vol. 24, no. 4, pp. 1693–1703, doi: 10.3233/BME-140981

20. Imai K. Computed Tomography-Based Finite Element Analysis to Assess Fracture Risk and Osteoporosis Treatment. Wjgem, 2015, vol. 5 (3), pp. 182–187, doi: 10.5493/wjgem. v5.i3.182

21. Crenshaw T.D., Peo Jr.E.R., Lewis A.J., Moser B.D. Bone Strength as a Trait for Assessing Mineralization in Swine: A Critical Review of Techniques Involved. J. Ani Sci., 1981, vol. 53 (3), pp. 827–835, doi: 10.2527/JAS1981.533827X.

Авторы публикации

Кротова Екатерина Викторовна – ведущий специалист КНИТУ-КАИ, Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева–КАИ (КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева). e-mail: kati_mit@mail.ru.

Саченков Оскар Александрович – канд.физ.-мат.наук, доцент, заведующий кафедрой «Компьютерной математики и информатики» (КМиИ). Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета (КФ(П)У). ORCID (0000-0002-8554-2938). e-mail: 4works@bk.ru.

Митряйкин Виктор Иванович – д-р.техн. наук, профессор, профессор кафедры «Машиноведения и инженерной графики» (МиИГ). Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева–КАИ (КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева). ORCID: 0000-0003-4640-5137. e-mail: vmitryaykin@bk.ru.

Зайцева Татьяна Александровна – канд.техн.наук, доцент кафедры «Машиноведения и инженерной графики» (МиИГ). Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева–КАИ (КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева). ORCID: 0000-0001-7836-4996. e-mail: tanechkaGA@mail.ru

Закиров Рустэм Хайдарович – заведующий отделением, врач-рентгенолог ГАУЗ «Республиканская клиническая инфекционная больница имени профессора А.Ф.Агафонова» г. Казань, e-mail: metsur@ya.ru

References

1. The National Program for the Development of the Far East: Decree of the Government of the Russian Federation No. 2464-p dated September 24, 2020 URL: <http://www.government.ru/docs/40487>.

2. Kablov E.N., Startsev V.O. System analysis of the influence of climate on the mechanical properties of polymer composite materials according to domestic and foreign sources//Aviation materials and technologies.2018. No.2 (51).pp.47-50.

3.Evdokimov A.A., Petrova A.P., Pavlovsky K.A., Gulyaev I.N. The influence of climatic aging on the properties of PCM based on an epoxylvinyl ether binder. Proceedings of VIAM, No.3(97) 2021, pp.128-131.

4. G.E.Okolnikova, D.A.Bronnikov, N.I.Shchedrin. The use of carbon fiber in wind farm structures. - System technologies. - 2018.-No.27.-pp.60-63.

5.Victor I. Mitryaykin; Tatiana A. Zaitseva; Oleg N. Bezzametov; Mikhail E. Kuznetsov. Effect of Impact Damages on the Strength of Wind Turbine Blade. 023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) | 979-8-3503-9952-3/23/\$31.00 ©2023 IEEE | DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086749

6.K.T.Tan, N.Watanabe, Y.Iwahori. Finite element model for compression after impact behavior of stitched composires/Composites. Part B: engineering Vol.79. 2015, pp 53-60.

7.Mocanu C., Pohlca A., Moise L., Tudose D. Comparative Studies on the Behaviour of Flat Panels

Made of GRP Under Static and Dynamic Loads. *Materiale Plactice*, 2021, Vol. 58, No. 4, pp. 222-237. doi: 10.37358/MP.21.4.5548

8. Zhang Y., Zheng J., Shen F., Han W., Munstermann S., Shou H., Liu Q. Analysis of local stress/strain fields in an HPDC AM60 plate containing pores with various characteristics. *Engineering Failure Analysis*. 2021, Vol. 127, pp. 105503. doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105503

9. Kotovshchikov I.O. Modern mobile systems of non-destructive testing of products made of composite materials// *Composite World*. 2018, No.6 (81), pp.54-56.

10. Shulaykin A.Yu., Popov M.A., Kovalev V.A., Ivanov A.V., Artamonov Yu.S., Shurygin A.E. Modern methods of diagnostics of objects made of composite materials// *Modern equipment and technologies*. 2016. №4.

11. Celko L., Gutierrez-Cano V., Casas-Luna M., Matula J., Oliver-Urrutia C., Remesova M., Dvorak K., Zikmund T., Kaiser J., Montufar E.B. Characterization of porosity and hollow defects in ceramic objects built by extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2021, No. 47, pp. 1-12. doi: 10.1016/j.addma.2021.102272

12. Vayberg E.I. Control of products made of composite materials by X-ray computed tomography-Flaw detection, 1984, No. 10, pp.32-35.

13. Sneha Samal, Mareeta Kolinova, Hubert Rahier, Giovanni Dal Poggetto and Ignazio Blanco Investigation of the Internal Structure of Fiber Reinforced Geopolymer Composite under Mechanical Impact: A Micro Computed Tomography Study// *Applied Sciences*. Vol.9. Issue 3.2019.p.516.

14. Gerasimov O. V., Rakhmatulin R.R., Baltina T.V., Sachenkov O.A. Determination of the stress-strain state of bones according to computed tomography data // *Izvestia of Higher educational institutions. Mechanical engineering*. 2023. No. 8 (761). pp. 3-15.

15. Akifyev K.N., Statsenko E. O., Smirnova V. V., Kharin N.V., Bolshakov P.V., Sachenkov O.A. Methodology for studying porosity of samples with liquid with an X-ray computed tomograph under uniaxial compression // *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. 2023. No. 2. pp. 11-21.

16. Computer tomographic control of the mechanical characteristics of composite and biological materials based on the Hounsfield scale density analogy method: dissertation... Candidate of Technical Sciences: 05.11.13 / Zaitseva Tatyana Alexandrovna; [Place of defense: Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI]. - Kazan, 2020. - 139 p.: ill.

17. Sachenkov O. A., Gerasimov O. V., Koroleva E. V., Mukhin D. A., Yaikova V.V., Akhtyamov I.F., Shakirova F.V., Korobeynikova D.A., Zhi K.K. Construction of an inhomogeneous finite element model based on computed tomography data. *Russian Journal of Biomechanics*, 2018, vol. 22, No.3, pp.290-302,, doi: 10.15593/RJBiomeh/2018.3.05.

18. Silva-Henao J., Synek A., Pahr D.H., Reisinger A.G. Selection of animal bone surrogate samples for orthopaedic screw testing based on human radius CT-derived bone morphology. *Med. Eng. Phys.*, 2022, vol. 103, pp. 103786. DOI: 10.1016/j.medengphy.2022.103786

19. Kieser D.C., Kanade S., Waddell N.J., Kieser J.A., Theis J.-C., Swain M.V. The deer femur — A morphological and biomechanical animal model of the human femur. *Biomed. Mater. Eng.*, 2014, vol. 24, no. 4, pp. 1693–1703, doi: 10.3233/BME-140981

20. Imai K. Computed Tomography-Based Finite Element Analysis to Assess Fracture Risk and Osteoporosis Treatment. *Wjgem*, 2015, vol. 5 (3), pp. 182–187, doi: 10.5493/wjem. v5.i3.182

21. Crenshaw T.D., Peo Jr.E.R., Lewis A.J., Moser B.D. Bone Strength as a Trait for Assessing Mineralization in Swine: A Critical Review of Techniques Involved. *J. Ani Sci.*, 1981, vol. 53 (3), pp. 827–835, doi: 10.2527/JAS1981.533827X.

Authors of the publication

Krotova Ekaterina Viktorovna- Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia. e-mail: kati_mit@mail.ru

Sachenkov Oscar Alexandrovich-Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia. ORCID (0000-0002-8554-2938). e-mail: 4works@bk.ru.

Mitryakin Viktor Ivanovich - Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia. ORCID: 0000-0003-4640-5137. e-mail: vmityaykin@bk.ru.

Zaitseva Tatyana Alexandrovna - Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia. ORCID: 0000-0001-7836-4996. e-mail: tanechkaGA@mail.ru.

Zakirov Rustem Haidarovich - GAU "Republican Clinical Infectious Diseases Hospital named after Professor A.F.Agafonov", Kazan, Russia. e-mail: metsur@ya.ru

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)

Получено 31.01.2024 г.

Отредактировано 07.02.2024 г.

Принято 12.03.2024 г.



СИСТЕМА ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВОГО МАСЛОПОЛНЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Галяутдинова А.Р., Ившин И.В., Соловьев С.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Alsu296@ya.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке новой системы оценки технического состояния силового маслонаполненного трансформаторного оборудования распределительных сетей. ЦЕЛЬ. Повысить точность оценки технического состояния силового маслонаполненного трансформаторного оборудования (СМТО) распределительных сетей за счет применения методов машинного обучения. В настоящее время увеличение объема анализируемой информации о состоянии СМТО распределительных сетей ведет к существенным изменениям при выборе методов обработки данных. Использование методов машинного обучения связано как с необходимостью применения эксплуатационного опыта (в виде экспертных оценок), так и получения объективных оценок состояния трансформаторного оборудования распределительных сетей из контрольно-измерительных приборов (КИП) и датчиков. МЕТОДЫ. В данной работе используются такие методы исследования как математическое моделирование, метод парных сравнений. В качестве примера рассматривается силовой маслонаполненный трансформатор ТМН-6300, его диагностические параметры, внешние и режимные параметры. Проводится оценка технического состояния трансформатора ТМН-6300 и создается прогнозная модель на базе существующей системы мониторинга, методов машинного обучения, которые позволяют формализовать экспертные знания и автоматизировать процесс обработки и анализа данных. РЕЗУЛЬТАТЫ. Для оценки и прогнозирования технического состояния СМТО распределительных сетей сформирована база данных. Алгоритм прогнозирования технического состояния СМТО в виде модели искусственной нейронной сети был апробирован в разработанной системе оценки. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Полученные в данной работе результаты оценки и прогнозирования технического состояния СМТО распределительных сетей доказывают безусловную взаимосвязь между параметрами СМТО и внешними, режимными параметрами. Данные, получаемые в результате моделирования, помогают повысить точность прогнозирования технического состояния и определить долгосрочные перспективы функционирования СМТО, своевременное проведение технического обслуживания и ремонта в горизонте по годам и месяцам.

Ключевые слова: система контроля; силовое маслонаполненное трансформаторное оборудование; распределительные сети; машинное обучение; методы контроля; оценка и прогнозирование технического состояния.

Для цитирования: Галяутдинова А.Р., Ившин И.В., Соловьев С.А. Система оценки и прогнозирования технического состояния силового маслонаполненного трансформаторного оборудования распределительных сетей с применением машинного обучения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 32-45. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-32-45.

SYSTEM FOR ASSESSMENT AND PREDICTION OF THE TECHNICAL CONDITION OF POWER OIL-FILLED TRANSFORMER EQUIPMENT OF DISTRIBUTION NETWORKS USING MACHINE LEARNING

Galyautdinova A.R., Ivshin I.V., Solovlev S.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Alsu296@ya.ru

Abstract: RELEVANCE the research is to develop a new system for assessing the technical condition of power oil-filled transformer equipment of distribution networks. OBJECT. To increase the accuracy of assessing the technical condition of power oil-filled transformer equipment (POTE) of distribution networks through the use of machine learning methods. Currently, an increase in the volume of analyzed information about the state of the management system of distribution networks leads to significant changes in the choice of data processing methods. The use of machine learning methods is associated both with the need to apply operational experience (in the form of expert assessments) and to obtain objective assessments of the condition of transformer equipment of distribution networks from instrumentation and sensors. METHODS. This work uses research methods such as mathematical modeling and the method of paired comparisons. As an example, we consider the oil-filled power transformer TMN-6300, its diagnostic parameters, external and operating parameters. The technical condition of the TMN-6300 transformer is assessed and a predictive model is created based on the existing monitoring system and machine learning methods, which make it possible to formalize expert knowledge and automate the process of data processing and analysis. RESULTS. A database has been created to assess and predict the technical condition of POTE of distribution network management systems. The algorithm for predicting the technical condition of POTE of the technical equipment in the form of an artificial neural network model was tested in the developed assessment system. CONCLUSION. The results of assessing and predicting the technical condition of POTE of the metering system of distribution networks obtained in this work prove the unconditional relationship between the parameters of the metering system and external, operating parameters. The data obtained as a result of modeling helps to increase the accuracy of forecasting the technical condition and determine the long-term prospects for the functioning of POTE the equipment management system, timely maintenance and repairs over the course of years and months.

Keywords: control system; power oil-filled transformer equipment; distribution networks; machine learning; control methods; assessment and forecasting of technical condition.

For citation: Galyautdinova A.R., Ivshin I.V., Solovov S.A. System for assessment and prediction of the technical condition of power oil-filled transformer equipment of distribution networks using machine learning. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (2): 32-45. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-32-45.

Введение (Introduction)

Контроль технического состояния СМТО распределительных сетей и прогнозирование его технического состояния является актуальной задачей и связаны с обеспечением бесперебойного и надежного электроснабжения потребителей. Трансформаторное оборудование в распределительных сетях Единой энергетической системы России характеризуется с высокой степенью износа[1]. Эксплуатация трансформаторного оборудования с превышением ресурса, определенным нормативно-технической документацией, приводит к частым отказам и возникновению аварий. Замена трансформаторного оборудования – важный экономический вопрос. В свою очередь, она сопровождается заменой большого числа вспомогательного оборудования, что с технической точки зрения нецелесообразно и влечет за собой существенные затраты. Исследования показывают необходимость перехода к организации ремонта основного электротехнического оборудования подстанции с системы планово-предупредительных ремонтов на техническое обслуживание и ремонт по фактическому состоянию, что позволит оптимизировать эксплуатационные затраты на техническое обслуживание и ремонт оборудования. Существует взаимосвязь между параметрами силового трансформатора и внешними, режимными параметрами. Степень этих взаимосвязей возможно определить только при комплексной оценке состояния диагностических параметров трансформатора, внешних и режимных параметров. В настоящее время объем данных увеличивается каждый год. Большие данные, рассматриваемые в электроэнергетике, необходимо изучать на стыке двух наук: математики и компьютерных информационных технологий, в которых создаются алгоритмы и технические решения для работы с массивами данных. Данные слишком велики для классических способов хранения и их обработки. Следовательно, анализ и обработка данных о состоянии СМТО распределительных сетей требует применение искусственного интеллекта[2]. Научная значимость исследования состоит в использовании методов машинного обучения для

оценки и прогнозирования технического состояния СМТО распределительных сетей. Практическая значимость исследования заключается в достижении эффективности при уменьшении эксплуатационных затрат на базе технически обоснованных характеристик состояния СМТО: объемов ремонта, замены, реконструкции и системы технического обслуживания.

Литературный обзор (Literature Review)

Одним из приоритетных направлений стратегии научно-технологического развития РФ до 2030 года является переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта[2]. Современная электроэнергетика требует большого внимания к надежности и качеству работы всей энергосистемы в целом. Однако старение и износ электрооборудования приводит к увеличению числа аварийных ситуаций, которые несут за собой неблагоприятные последствия. Ситуация усугубляется ростом энергопотребления во всем мире, в результате чего нагрузка на оборудование с истекшим сроком эксплуатации возрастает.

Силовое трансформаторное оборудование является наиболее важным компонентом объектов электроэнергетической системы, который непосредственно участвует в процессе передачи и распределения электрической энергии. От его надежной работы зависит надежное функционирование всей электроэнергетической системы[3]. К силовому трансформаторному оборудованию предъявляются высокие требования по надежности.

Основные функциональные узлы силового масляного трансформатора:

- магнитная система (МС);
- изоляционная система (ИС);
- высоковольтные вводы (ВВ);
- обмотки (ОБМ);
- система регулирования напряжения (РПН);
- система охлаждения (СО);
- обобщенный узел (ОУ).

Исследование каждой системы как отдельного объекта и их взаимное влияние друг к другу приведет более к детальной оценке технического состояния СМТО и формированию новых знаний об оценке технического состояния.

Надежность работы СМТО непосредственно связана с его сроком службы. Рост повреждаемости при работе за пределами нормированного срока службы (25 лет) увеличивает расходы на текущий ремонт СМТО и повышает вероятность аварийного выхода его из строя[4]. Это обуславливает повышенное внимание к методам диагностики и системам мониторинга СМТО, которые позволяют определить техническое состояние СМТО и поддержать его эксплуатационную надежность. Следовательно, крайне актуальными становятся вопросы поиска новых подходов и методов мониторинга, контроля и диагностики для возможности продления срока эксплуатации этих трансформаторов без потери надежности.

Таким образом, проблема оценки и прогнозирования технического состояния СМТО распределительных сетей в настоящее время остается актуальной и охватывает целый ряд аспектов:

- Высокая степень износа СМТО[4];
- Необходимость раннего обнаружения аномалий СМТО;
- Цифровая трансформация электроэнергетической отрасли России;
- Необходимость перехода к системе технического обслуживания и ремонта СМТО по его техническому состоянию.

Материалы и методы (Materials and methods)

Большой объем СМТО распределительных сетей с выработанным ресурсом, отсутствие возможности их одновременной замены связаны с финансовыми затратами и трудностью обеспечения условий режима на время вывода СМТО в ремонт. Все это приводит к необходимости непрерывного мониторинга и прогнозирования технического состояния для использования оптимального графика технического обслуживания и ремонтов, снижения вероятности возникновения аварийных отказов СМТО[5]. Эксплуатация СМТО распределительных сетей с выработанным ресурсом приводит к увеличению капитальных затрат, необходимых для надежного функционирования электроэнергетической системы.

Современные тенденции развития методов диагностики СМТО указывают на развитие методов непрерывного контроля под напряжением и предиктивной диагностики.

Следовательно, создание системы оценки через непрерывный контроль и представление СМТО в виде функциональных узлов является актуальной задачей. По результатам исследований делается оценка и прогнозирование технического состояния трансформатора в целом.

В качестве объекта исследования рассмотрен силовой маслонаполненный трансформатор марки ТМН-6300 35/6(10) кВ. По каждому функциональному узлу силового трансформатора выбрали диагностические параметры для установления системы мониторинга.

Выбранные диагностические параметры по основным функциональным узлам силового трансформатора следующие:

1) в МС:

- температура масла в баке – регистрация температурных режимов работы трансформатора.

- виброскорость бака – контроль технического состояния конструкции трансформатора по параметрам вибрации (степень опрессовки обмоток трансформатора, оценка прочностных характеристик силовых элементов трансформатора).

2) в ИС:

- хроматографический анализ растворенных газов (ХАРГ) в масле – анализ растворенных в масле газов (ухудшение состояния изоляции и масла, перегрев, наличие локальных горячих точек, частичных и дуговых разрядов) [6]. Выбранный газоанализатор Intellix GLA 100 имеет 100% чувствительность к H_2 , т.е. общая сигнализация силового трансформатора о превышении концентрации газа, а также чувствителен к CO – при перегреве бумажной изоляции.

- уровень частичных разрядов – контроль состояния изоляции на основании регистрации и анализа частичных разрядов.

3) в ВВ:

- температура контактных соединений вводов – контроль температурных режимов работы трансформатора.

4) в ОБМ:

- влагосодержание масла – контроль текущей электрической прочности масла и влагосодержания в твердой изоляции обмоток трансформатора.

5) в обобщенном узле:

- срок службы – оценка технического состояния всего трансформатора.

Дополнительно измеряются внешние и режимные параметры трансформатора – температура окружающей среды и относительная влажность воздуха, коэффициент загрузки.

Выбор системы мониторинга для рассматриваемого трансформатора представлен в [7]. Система мониторинга по двум критериям:

- возможность определения технического состояния силового трансформатора;
- регистрация и анализ данных в режиме реального времени с целью определения технического состояния.

Перечень оборудования для мониторинга выбранных диагностических параметров технического состояния маслонаполненного силового трансформатора 35/6(10) кВ представлен в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Перечень оборудования для мониторинга технического состояния силового трансформатора

List of equipment for power transformer technical condition monitoring

Тип оборудования	Диагностические параметры	Контрольно-измерительные приборы
Силовой трансформатор ТМН – 6300 35/6(10)	ХАРГ в масле	Газоанализатор Intellix GLA 100
	Влагосодержание масла	Система TDM-10
	Температура масла в баке	Системы TDM-10, TDM-S
	Температура контактных соединений вводов	Датчики RF-Sens, WDM-T
	Уровень частичных разрядов	Системы TDM-S, TDM-10
	Виброскорость бака	Датчик вибрации ИВД-3Ц-3, система TDM-10

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Разработанная система мониторинга для рассматриваемого силового

маслонаполненного трансформатора 35/6(10) кВ (рис.1).



Рис. 1. Система мониторинга силового трансформатора ТМН-6300 35/6(10) кВ
Fig.1. Monitoring system for power transformer TMN-6300 35/6(10) kV

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Измеренные значения параметров силового маслаполненного трансформатора передаются в режиме реального времени с периодичностью 1 раз в минуту на III уровень системы – web-сервер.

Оценка технического состояния СМТО основывается на сопоставлении измеренных значений параметров оборудования с их нормативными значениями, в соответствии с требованиями, установленными нормативно-технической документацией. Результатом оценки является коэффициент экспресс-анализа (КЭА) силового маслаполненного трансформаторного оборудования, который выводится в виде численной величины[8]. КЭА находится в диапазоне [0; 100], где самое наихудшее значение соответствует 0, а наилучшее – 100. Данные диапазона приведены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Диапазоны КЭА
Ranges of CEA

Диапазон КЭА	Вид технического состояния	Визуализация (цвет)
0 < и ≤ 25	Критическое	Красный
25 < и ≤ 50	Неудовлетворительное	Оранжевый
50 < и ≤ 70	Удовлетворительное	Желтый
70 < и ≤ 85	Хорошее	Зеленый
85 < и ≤ 100	Очень хорошее	Т-зеленый

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Расчет КЭА силового маслаполненного трансформатора вычисляется по формуле:

$$КЭА = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n KB_i \times B_i}{4}, \quad (1)$$

где KB_i – значение весового коэффициента диагностических параметров;

B_i – значение, определенное в соответствии с методикой балльной оценки параметров[9].

Весовые коэффициенты параметров технического состояния отражают их важность и характеризуют степень влияния на надежность и работоспособность трансформаторного оборудования. Весовые коэффициенты определяются методом Саати[10]. Идея метода состоит в том, что попарно сравниваются каждые два диагностических параметра и определяется первенство одного из них. Весовой коэффициент каждому диагностическому параметру присваивается по важности, на основании экспертной оценки. Весовой коэффициент указывается в долях и принимает значение от 0 до 1. Для выбранных

диагностических параметров силового маслонаполненного трансформатора рассчитаны весовые коэффициенты (таблица 3).

Таблица 3
Table 3

Весовые коэффициенты диагностических параметров
Weighting coefficients of diagnostic parameters

№ п/п	Диагностические параметры	Весовые коэффициенты
X1	Уровень частичных разрядов	0,19
X2	Влагосодержание масла	0,19
X3	ХАРГ в масле	0,1
X4	Температура контактных соединений вводов фазы А	0,096
X5	Температура контактных соединений вводов фазы В	0,096
X6	Температура контактных соединений вводов фазы С	0,096
X7	Виброскорость бака	0,062
X8	Температура масла в баке	0,051
X9	Срок службы	0,022
X10	Температура окружающей среды	0,033
X11	Относительная влажность воздуха	0,031
X12	Коэффициент загрузки	0,033
Итого		1

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Каждый диагностический параметр силового маслонаполненного трансформатора оценивается в соответствии с балльной шкалой оценки отклонения фактических значений от предельно-допустимых. Балльная оценка характеризует качественную оценку параметров технического состояния и уровень выполнения требуемых функций от «0» (наихудшая оценка) до «4» (наилучшая оценка) (таблица 4).

Таблица 4
Table 4

Определение балльной шкалы значений [9]
Definition of the point value scale [9]

№ п/п	Балльная шкала	Описание диапазон значений параметров
1.	Балл 4	Отсутствует отклонение измеряемых параметров от нормативно-технической документации, оборудование выполняет требуемые функции в полном объеме.
2.	Балл 3	Параметры состояния оборудования находятся в пределах нормативно-технической документации, но появилась тенденция ухудшения значения контролируемого параметра.
3.	Балл 2	Параметры состояния оборудования находятся в пределах нормативно-технической документации, но возникает угроза наступления отказов, появляются первые признаки отклонения от выполнения требуемых функций оборудования.
4.	Балл 1	Указывает на предельно-допустимое состояние – параметры находятся близко к критическим значениям, оборудование выполняет требуемые функции не в полном объеме.
5.	Балл 0	Указывает на неудовлетворительное состояние – параметры состояния оборудования не соответствуют нормативно-технической документации, находятся в критичном значении. Дальнейшая эксплуатация оборудования недопустима.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В настоящее время данные играют важную роль в принятии решение, в частности, в электроэнергетике. Процесс обработки и анализа больших объемов данных (Big Data), позволяет выявлять новые тренды и находить новые закономерности. Обработка и анализ больших объемов данных требует использования специализированных инструментов и технологий, одним из которых являются методы машинного обучения. Использование методов машинного обучения связано как с необходимостью применения

эксплуатационного опыта (в виде экспертных оценок), так и получения объективных оценок состояния силового трансформатора, исключая человеческий фактор.

Машинное обучение – это раздел искусственного интеллекта, позволяющий системе обучаться на основе данных. Одной из составляющих машинного обучения является аппарат искусственных нейронных сетей, основанный на принципах работы биологического мозга. Применение методов машинного обучения для поиска неявных связей и корреляций между набором диагностических параметров силового маслонаполненного трансформатора позволяет получить достоверную оценку трансформатора [11]. Следовательно, своевременное принятие решения для продления срока эксплуатации трансформатора. Искусственные нейронные сети представляют собой сложные техники, способные моделировать сложные отношения. Одним из преимуществ нейронных сетей является способность обрабатывать нелинейные отношения и большой объем данных. Нейронные сети основаны на распознавании образов и некоторых процессов искусственного интеллекта, которые графически «моделируют» параметры. Они могут работать, когда неизвестна математическая формула, которая связывает входные данные с выходными [12].

Концепция нейронных сетей основана на том, как организована работа человеческого мозга, который обрабатывает данные как раз с помощью сети биологических нейронов (рис.2.). Базовым понятием искусственной нейронной сети является искусственный нейрон, который представляет собой простой вычислительный элемент [13].

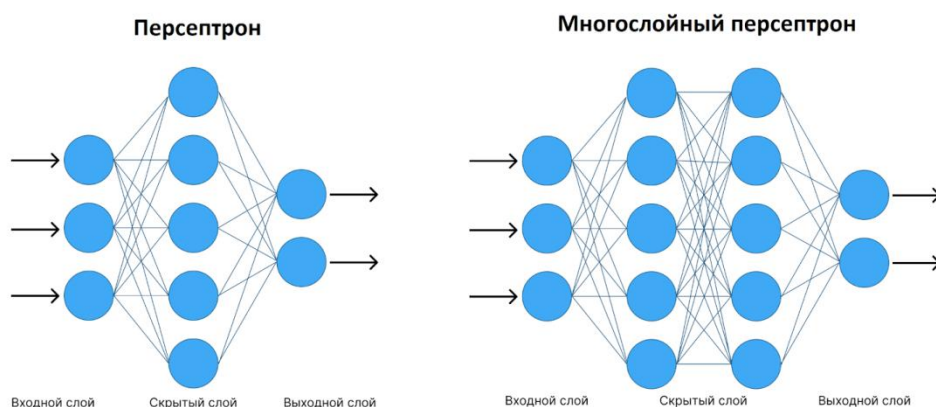


Рис.2. Модель нейронной сети

Fig.2. Neural network model

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты (Results)

Исходные данные для создания базы данных системы оценки технического состояния силового маслонаполненного трансформатора представлены в таблице 5.

Искусственный нейрон имеет вход, на который подается входной сигнал, вектор x , веса, вектор w , сумматор, который находит взвешенную сумму входных сигналов, а также функцию активации и выход. Функция активации дает нейрону нелинейные свойства. Поскольку нейрон – это не линейная функция, то объединение нейронов в систему приводит к эффекту эмерджентности, т.е. появлению у системы свойств, не присущих ее элементам в отдельности [14].

Процесс обучения модели на обучающей выборке и контроля результатов на валидационной выборке позволяет подобрать её подходящую архитектуру. Но в каждом конкретном случае определение числа слоев – это итерационный процесс, для которого также можно использовать различные подходы и алгоритмы.

Обучение модели и сама оценка технического состояния СМТО осуществляется на языке программирования Python, который широко применяется в разработке прикладного программного обеспечения, машинном обучении и обработке больших данных. Это высокоуровневый язык программирования, который отличается эффективностью, простотой и универсальностью использования.

На рисунках 3 и 4 представлена визуализация загружаемых данных трансформатора.

Таблица 5
Table 5Данные для формирования базы данных
Data for database formation

№ п/п	Диагностические параметры	Хорошее состояние t	Неудовлетворительное состояние	Критическое состояние	Функция
	Балльная оценка	4	2	1	
Данные из системы мониторинга					
X1	Уровень частичных разрядов	$(-60) \leq x < (-30)$	$(-30) \leq x < (-20)$	$(-20) \leq x < (-8)$	
X2	Влагосодержание масла	$x/30 < 1$ и $x/25 \leq 1$	$x/30 \leq 1$ и $x/25 > 1$	$x/30 > 1$	
X3	ХАРГ в масле	$25 \leq x \leq 399$	$400 \leq x \leq 499$	$500 \leq x \leq 5000$	
При $I_{раб} = (0,3-0,6) \cdot I_{ном}$, т.е. $0,3 \leq X12 < 0,6$					
X4'	Температура контактных соединений вводов фазы А	$x < 10$	$10 \leq x < 30$	$x \geq 30$	$(X4-X10)^* (0,5 \cdot X12/X13)^2$
X5'	Температура контактных соединений вводов фазы В	$x < 10$	$10 \leq x < 30$	$x \geq 30$	$(X5-X10)^* (0,5 \cdot X12/X13)^2$
X6'	Температура контактных соединений вводов фазы С	$x < 10$	$10 \leq x < 30$	$x \geq 30$	$(X6-X10)^* (0,5 \cdot X12/X13)^2$
ИЛИ					
При $I_{раб} = (0,6-1) \cdot I_{ном}$, т.е. $0,6 \leq X12 \leq 1$					
X4''	Температура контактных соединений вводов фазы А	$x < 20$	$20 \leq x < 40$	$x \geq 40$	$(X4-X10)^* (X14/X13)^2$
X5''	Температура контактных соединений вводов фазы В	$x < 20$	$20 \leq x < 40$	$x \geq 40$	$(X4-X10)^* (X14/X13)^2$
X6''	Температура контактных соединений вводов фазы С	$x < 20$	$20 \leq x < 40$	$x \geq 40$	$(X4-X10)^* (X14/X13)^2$
X7	Виброскорость бака	$x < 6,1$	$6,1 \leq x < 10$	$x \geq 10$	
X8	Температура масла	$x < 80$	$80 \leq x < 95$	$x \geq 95$	
X9	Срок службы	$x < 0,57$	$0,57 \leq x < 1,85$	$x \geq 1,85$	$(X16 - X15) / 25$
X10	Температура окружающей среды	$(-45) < x < (+40)$		$x \geq (+40)$ или $x \leq (-45)$	
X11	Относительная влажность воздуха	$x \leq 75$		$x > 75$	
X12	Коэффициент загрузки	$x < 0,8$	$0,8 \leq x < 1,2$	$1,2 \leq x < 1,6$	$X13/X14$
Паспортные данные трансформатора					
X13	Рабочий ток	31,17			
X14	Номинальный ток	103,9			
X15	Год изготовления	1982			
X16	Текущий год	2023			

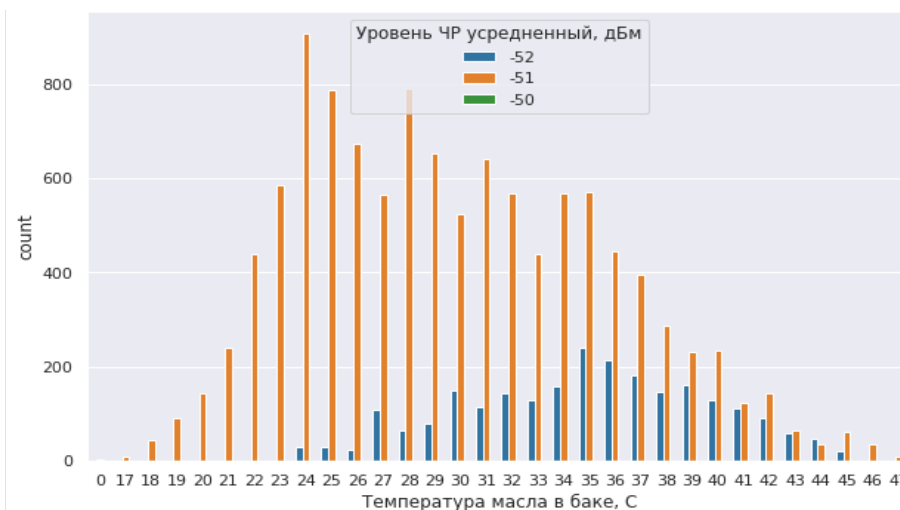


Рис.3. Распределение температуры масла в баке и уровня частичных разрядов: по оси X – распределение за 47 дней; по оси Y – значения температуры и уровня частичных разрядов

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



Рис.4. Распределение температуры масла в баке: по оси X – температура масла за 28 дней; по оси Y – значения температуры в °C

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как и отмечалось выше, в разрабатываемой системе оценки и прогнозирования технического состояния силового маслонаполненного трансформатора 12 входных параметров (X1-X12) и один выходной параметр – КЭА (Y).

В нашем случае мы построили однослойную нейронную сеть с нейронными связями. В систему поступает, кроме текущих значений параметров, еще и значения предыдущих методов контроля, чтобы нейронная сеть смогла научиться оценивать динамику состояний, изменения состояний трансформаторного оборудования[15].

Для качественной работы нейронной сети важно подобрать оптимальное число нейронов в скрытом слое. Точность предсказания результата применения нейронной сети можно определить с помощью коэффициента детерминации R^2 . На рисунке 5 представлены результаты оценки работы сети с разным количеством нейронов.

Отрицательное значение R^2 при малом количестве нейронов говорит о том, что модель не объясняет изменчивости данных и работает хуже, чем выбор простое среднее. Нулевое значение R^2 говорит о том, что модель не предсказывает изменчивости данных, но также хороша, как и простое среднее. Положительное значение R^2 говорит о том, что модель лучше, чем простое среднее, и объясняет часть изменчивости данных. Из графиков видно, что увеличение числа нейронов делает модель лучше, а увеличение числа эпох хуже. Отличное значение получилось при использовании 2048 нейронов и 25 эпох.

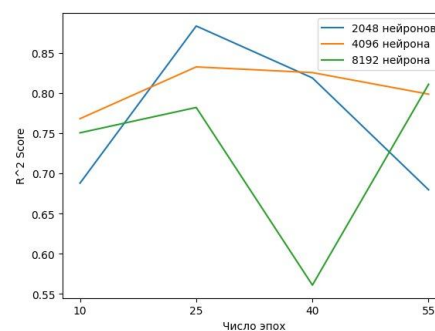
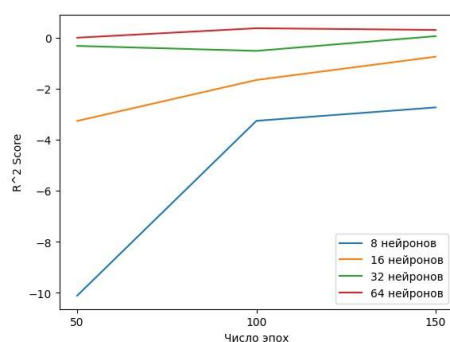


Рис.5. Анализ влияния количества нейронов на точность предсказания результата

Fig.5. Analysis of the influence of the number of neurons on the accuracy of predicting the result

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 6 представлен график изменения ошибки обучения и тестирования при обучении в зависимости от количества эпох. После 15 эпохи ошибки стали двигаться возле одного определённого значения и перестали изменяться. Дальнейшее обучение не приводит к улучшению показателей. Модель предсказывает 85 % данных.

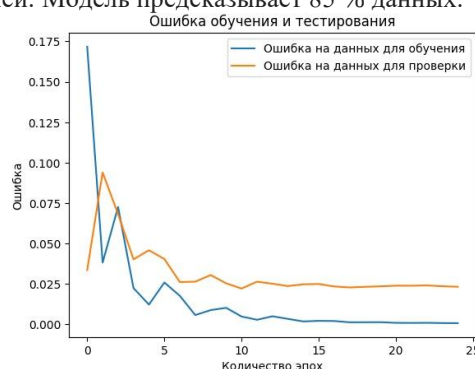


Рис. 6. Изменение ошибки при обучении в зависимости от количества эпох для модели 2048 нейронов

Fig.6. Change in training error depending on the number of epochs for a model of 2048 neurons

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На обучающей выборке обучили модель нейронной сети. Наилучшее значение получилось при использовании в модели 2048 нейронов и 25 эпох. Модель на тестовой выборке показала результат – 0,85, т.е. модель предсказывает техническое состояние силового трансформатора с точностью 85%. Выходной нейрон – КЭА – на основании текущего состояния и динамики изменений, будет говорить, какой вид технического воздействия необходимо применить.

Результаты оценки технического состояния силового трансформатора ранжируются по убыванию КЭА. Наименьший КЭА определяет наивысший приоритет необходимости осуществления технического воздействия. Диапазоны КЭА определяют необходимые виды технического воздействия. Они приведены в таблице 6 [16].

Таблица 6

Table 6

Вид технического воздействия по диапазону КЭА
Type of technical impact according to the range of CEA

Диапазон КЭА	Вид технического состояния	Вид технического воздействия
$0 < \text{и} \leq 25$	Критическое	Вывод из эксплуатации, техническое перевооружение и реконструкция
$25 < \text{и} \leq 50$	Неудовлетворительное	Дополнительное техническое обслуживание и ремонт, усиленный контроль технического состояния, техническое перевооружение
$50 < \text{и} \leq 70$	Удовлетворительное	Усиленный контроль технического состояния, капитальный ремонт, реконструкция
$70 < \text{и} \leq 85$	Хорошее	По результатам планового диагностирования
$85 < \text{и} \leq 100$	Очень хорошее	Плановое диагностирование

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Собственно, таким образом, можно выстроить систему оценки и прогнозирования технического состояния силового трансформатора на основе 12 диагностических параметров.

Обсуждение (Discussions)

На основе методики оценки технического состояния построена модель нейронной сети для прогнозирования работы трансформатора. Полученная точность прогнозирования – 85%, показывает, что модель дообучена на имеющихся данных и может работать с определенной точностью. Большое количество нейронов в модели связано с искусственным созданием обучающих данных. Модель может быть дообучена и оптимизирована при работе с реальными данными.

На основе полученных результатов предложены следующие рекомендации:

1. Если КЭА силового трансформатора входит в диапазон (50;70] и ниже, то необходимо дополнительно анализировать внешние и режимные параметры силового трансформатора.

2. Внести корректировки в карту ремонтов для технического обслуживания оборудования силового трансформатора по его фактическому техническому состоянию, согласно данной оценке.

Заключение (Conclusions)

Из всего оборудования электрических подстанций силовое трансформаторное оборудование является одним из критически важных, в силу своей сложности и функциональной ответственности. А также является наиболее дорогостоящим элементом электроэнергетической системы по ремонту и техническому обслуживанию, его выход из строя приводит к большим экономическим потерям[17]. В настоящее время задача оценки и прогнозирования технического состояния силового трансформаторного оборудования распределительных сетей в ЕЭС России актуальна. Анализ парка СМТО распределительных сетей показал, что 60% эксплуатируемого трансформаторного оборудования в распределительных сетях выработало свой нормативный ресурс 25 лет [18]. Это указывает на необходимость использования комплексных систем оценки и прогнозирования технического состояния для принятия решений о функционировании, проведении ремонтных работ или замене трансформаторного оборудования.

Исследование каждого функционального узла СМТО как отдельного объекта и их взаимное влияние друг к другу привело более к детальной оценке его технического состояния, что позволит продлить срок эксплуатации. Исследуемые методы показывают лучшие характеристики, чем многие традиционные методы оценки технического состояния трансформаторного оборудования, и исключают планово-предупредительный ремонт. При планово-предупредительном ремонте проводят технические осмотры, ремонт и замену узлов трансформаторного оборудования по заранее составленному графику, с целью обеспечения его безотказной работы. Что не всегда исключает непредвиденные расходы за техническое обслуживание и ремонт. Наиболее эффективной системой является система технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию. Для перехода к такой системе необходимо разработать базу данных, т.е. собрать ретроспективу по каждому исследуемому силовому маслонаполненному трансформатору распределительных сетей.

Таким образом, разработана система оценки и прогнозирования технического состояния СМТО распределительных сетей с применением машинного обучения. Под рассматриваемый силовой трансформатор создана система мониторинга, которая работает в режиме реального времени. По каждому диагностическому параметру определены предельно-допустимые значения. Сформирована база данных для системы оценки и прогнозирования технического состояния. Результаты оценки и прогнозирования технического состояния силового маслонаполненного трансформатора показали точность 85%, что позволяет внести корректировки в карту ремонтов и оптимизировать эксплуатационные затраты.

Литература

1. Galyautdinova A., Ivshin I., Vladimirov O., et al. Software and algorithmic support for online assessment of transformer substation technical condition 35/6(10) kV. REEPE 2023: Proceedings of the 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering; 16-18 March 2023; Moscow, Russian Federation. Moscow: IEEE; 2023. pp. 28-40.
2. Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 №642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации».
3. Галаяутдинова А.Р., Ившин И.В. Анализ параметров силового маслонаполненного трансформатора распределительных сетей для оценки его технического состояния // Материалы V

Всероссийской научно-практической (с международным участием) конференции, посвященной празднованию 55-летия КГЭУ. В 2-х томах, Казань, 11–12 октября 2023 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 234-238.

4. Khalyasmaa A., Matrenin P., Eroshenko S. Averaged errors as a risk factor for intelligent forecasting systems operation in the power industry. Smart Energy. USSEC 2021: Proceedings of the 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference, USSEC 2021. 13–15 November 2021; Novosibirsk, 2021. pp. 192-196. doi 10.1109/USSEC53120.2021.9655742.

5. Хальясмаа А.И., Ревенков И.С., Сидорова А.В. Применение технологии цифрового двойника для анализа и прогнозирования состояния трансформаторного оборудования // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14, № 3(55). С. 99-113.

6. Byerly J., Schneider C., Schloss R. et al. Real-time circuit breaker health diagnostics. CPRE 2017: Proceedings of the 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers, CPRE 2017. pp. 1-6.

7. Ившин И.В., Галяутдинова А.Р., Владимиров О.В. и др. Методика онлайн оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ по коэффициенту экспресс-анализа // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23, № 4. С. 14-26.

8. Vladimirov O., Galyautdinova A., Ivshin I., et al. Equipment and data transmission system for express analysis of the technical condition of the main equipment of the 35/6(10)kV transformer substation. Efficient Production and Processing. 2021: Proceedings of ICEPP 2021, 18-20 February 2021; Kazan: ICEPP 2021. pp. 577-583.

9. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 26.07.2017 № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей».

10. www.edu.tltsu.ru Метод парных сравнений (Метод Саати).

11. Khruslov L., Rostovikov M., Shishov V. Web-based power quality monitoring system of smart transformer substation RTP-34 MPEI for engineering education. INFORNO-2016: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, INFORNO-2016. pp. 639-642.

12. Никулин С.А., Карнавский Е.Л. Оптимизация режимов установок электрохимической защиты // Системы управления и информационные технологии. 2014. № 3 (57). С. 64–68.

13. Li Z., Yang J., Zhang Z. et al. Real Time Evaluation Algorithm for Measurement Performance of Substation Voltage Transformer Based on Artificial Neural Network. Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2018. pp.1-4.

14. Gao Q., Zhong C., Wang Y., Wang P., Yu Z., Zhang J. Defect analysis of the same batch of substation equipment based on big data analysis algorithm. Proceeding of the 3rd International Conference on Green Energy and Sustainable Development. 2021. V.651. pp. 1-8.

15. Eroshenko S., Khalyasmaa A., Snegirev D., et al. The impact of data filtration on the accuracy of multiple time-domain forecasting for photovoltaic power plants generation. Applied Sciences (Switzerland), 2020. V. 10, № 22. pp. 1-22. doi: 10.3390/app10228265.

16. Farhadi M., Mollayi N. Application of the least square support vector machine for point-to-point forecasting of the PV power. International Journal of Electrical and Computer Engineering, August 2019.V.9(4). pp. 2205 – 2211.

17. Alimi O., Ouahada K., Abu-Mahfouz A. A review of machine learning approaches to power system security and stability. IEEE Access, art. 8, № 9121208, 2020. pp.113512-113531.

18. 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.

Авторы публикации

Галяутдинова Алсу Ренатовна – аспирант, преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID*: <http://orcid.org/0009-0000-4234-992X>. E-mail: Alsu296@yandex.ru.

Ившин Игорь Владимирович – докт. техн. наук, профессор, проректор по науке и коммерциализации, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-3124-2005>. E-mail: ivshini@mail.ru.

Соловьев Сергей Анатольевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационные технологии и интеллектуальные системы» (ИТИС) Казанского

References

1. Galyautdinova A., Ivshin I., Vladimirov O., et al. Software and algorithmic support for online assessment of transformer substation technical condition 35/6(10) kV. *REEPE 2023: Proceedings of the 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering*; 16-18 March 2023; Moscow, Russian Federation. Moscow: IEEE; 2023. pp. 28-40.
2. Decree of the President of the Russian Federation 01.12.2016 № 642 About the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation.
3. Galyautdinova AR, Ivshin IV, Analysis of parameters of power oil filled transformers of distribution networks to assess its technical condition. *Proceedings of the V All-Russian scientific and practical (with international participation) conference dedicated to the celebration of the 55th anniversary of KSPEU. In 2 volumes, Kazan, October 11–12, 2023*; Kazan: Kazan State Power Energy University, 2023. pp. 234-238. (In Russ.).
4. Khalyasmaa A., Matrenin P., Eroshenko S. Averaged errors as a risk factor for intelligent forecasting systems operation in the power industry. *Smart Energy. USSEC 2021: Proceedings of the 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference, USSEC 2021. 13–15 November 2021*; Novosibirsk, 2021. pp. 192-196. doi 10.1109/USSEC53120.2021.9655742.
5. Khalyasmaa AI, Revenkov IS, Sidorova AV Application of digital twin technology for analysis and prediction state of power transformer equipment. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2022; 55(3):99-113. (In Russ.).
6. Byerly J., Schneider C., Schloss R. et al. Real-time circuit breaker health diagnostics. CPRE 2017: Proceedings of the 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers, CPRE 2017. pp. 1-6.
7. Ivshin IV, Galyautdinova AR, Vladimirov OV, et al. Methodology of online assessment of technical state of transformer substation 35/6 (10) kV by express analysis coefficient. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021; 23(4):14-26. (In Russ.). doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-4-14-26.
8. Vladimirov O., Galyautdinova A., Ivshin I., et al. Equipment and data transmission system for express analysis of the technical condition of the main equipment of the 35/6(10)kV transformer substation. *Efficient Production and Processing. 2021: Proceedings of ICEPP 2021, 18-20 February 2021*; Kazan: ICEPP 2021. pp. 577-583.
9. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation 26.07.2017 № 676 On approval of the methodology for assessing the technical condition of the main technological equipment and power lines of power plants and electrical networks.
10. www.edu.tltsu.ru Method of paired comparisons (Saaty method).
11. Khruslov L., Rostovikov M., Shishov V. Web-based power quality monitoring system of smart transformer substation RTP-34 MPEI for engineering education. *INFORNO-2016: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, INFORNO-2016*. pp. 639-642.
12. Nikulin SA, Karnavsky EL Optimization of electrochemical protection installation modes. *Automation and remote control*. 2014; 3(57): 64–68. (In Russ.).
13. Li Z., Yang J., Zhang Z. et al. Real Time Evaluation Algorithm for Measurement Performance of Substation Voltage Transformer Based on Artificial Neural Network. *Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2018. pp.1-4.
14. Gao Q., Zhong C., Wang Y., Wang P., Yu Z., Zhang J. Defect analysis of the same batch of substation equipment based on big data analysis algorithm. *Proceedings of the 3rd International Conference on Green Energy and Sustainable Development*. 2021. V.651. pp. 1-8.
15. Eroshenko S., Khalyasmaa A., Snegirev D., et al. The impact of data filtration on the accuracy of multiple time-domain forecasting for photovoltaic power plants generation. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2020. V. 10, № 22. pp. 1-22. doi: 10.3390/app10228265.
16. Farhadi M., Mollayi N. Application of the least square support vector machine for point-to-point forecasting of the PV power. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, August 2019. V.9(4). pp. 2205 - 2211.
17. Alimi O., Ouahada K., Abu-Mahfouz A. A review of machine learning approaches to power system security and stability. *IEEE Access*, art. 8, № 9121208, 2020. pp.113512-113531.
18. Gavrilenko AV, Dolin AP Quality control system for pressing windings and steel of transformers based on vibration measurements, monitoring the condition of oil pumps. *Dimrus. Perm*, 2015. pp. 60. (In Russ.).

Authors of the publication

Igor V. Ivshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-3124-2005>. E-mail: ivshini@mail.ru.

Alsu R. Galyautdinova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0009-0000-4234-992X>. E-mail: Alsu296@yandex.ru.

Sergei A. Solovev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-8428-3367>. E-mail: solovev.sa@kgeu.ru.

Научная специальность: 2.2.8 Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Получено **05.02.2024 г.**

Отредактировано **11.02.2024 г.**

Принято **16.02.2024 г.**

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.311.61

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-2-46-54

СОЗДАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА «СОЗДАНИЕ СЕРИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С МОДЕРНИЗИРОВАННЫМ РОТОРОМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА МАЛОЙ МОЩНОСТИ»

Басенко В.Р., Петров Т.И., Ибрагимова А.Р.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
vasiliybas123@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Задачи создания современных синхронных двигателей с постоянными магнитами требуют решения технических задач совместно с экономическими реалиями. Ввиду использования постоянных магнитов в конструкции синхронных двигателей их стоимость ограничивает их промышленное применение. Поэтому стоит актуальный вопрос оптимизации конструкции синхронных двигателей, которую можно решить путем изменения топологии. *ЦЕЛЬ.* Целью является создание более экономичных синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) в электротранспорте малой мощности. Планируется реализовать способ новый способ конструирования СДПМ. Данное решение позволит уменьшить массо-габаритные параметры и увеличить удельную мощность, которые являются важными показателями для электротранспорта. *МЕТОДЫ.* Для модернизации современных синхронных двигателей предлагается метод комплексной топологической оптимизации на основе генетического алгоритма. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Получена компьютерная модель в виде расчета электромагнитных полей в статоре и роторе синхронного двигателя с постоянными магнитами. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Моделирование параметров синхронных двигателей с постоянными магнитами имеет малую степень разработанности в отечественном машиностроении ввиду отсутствия развитой инфраструктуры в области электрического транспорта малой мощности, создание отечественных разработок в данной области носит стратегический характер.

Ключевые слова: электротранспорт; синхронные двигатели с постоянными магнитами, компьютерная модель, комплексная топологическая оптимизация.

Благодарности: Публикация статьи осуществлена в рамках проекта «Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для электротранспорта малой мощности», Договор №419ГССС15-L/78948 от 08.09.2022 совместно с «Фондом содействия инновациям».

Для цитирования: Басенко В.Р., Петров Т.И., Ибрагимова А.Р. Создание компьютерной модели синхронного двигателя для реализации проекта «Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для электротранспорта малой мощности» // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 46-54. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-46-54.

CREATING A COMPUTER MODEL OF A SYNCHRONOUS MOTOR FOR THE IMPLEMENTATION OF THE PROJECT «CREATION OF A SERIES OF ELECTRIC MOTORS WITH A MODERNIZED ROTOR FOR ELECTRIC TRANSPORT OF LOW POWER»

Basenko V.R., Petrov T.I., Ibragimova A.R.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
vasiliybas123@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The challenges of creating modern permanent magnet synchronous motors require solving technical problems in conjunction with economic realities. Due to the use of permanent magnets in the construction of synchronous motors, their cost limits their industrial application. Therefore, there is an urgent issue of optimizing the design of synchronous motors, which can be solved by changing the topology. *TARGET.* The goal is to create more economical permanent magnet synchronous motors (PMSMs) in low-power electric vehicles. It is planned to implement a new method for constructing PMSM. This solution will reduce weight and size parameters and increase specific power, which are important indicators for electric transport. *METHODS.* To modernize modern synchronous motors, a complex topological optimization method based on a genetic algorithm is proposed. *RESULTS.* A computer model was obtained in the form of calculation of electromagnetic fields in the stator and rotor of a synchronous motor with permanent magnets. *CONCLUSION.* Modeling the parameters of synchronous motors with permanent magnets has a low degree of development in the domestic mechanical engineering due to the lack of developed infrastructure in the field of low-power electric transport; the creation of domestic developments in this area is of a strategic nature.

Key words: electric transport; permanent magnet synchronous motors, computer model, complex topological optimization.

Acknowledgments: The article was published within the framework of the project “Creation of a series of electric motors with a modernized rotor for low-power electric vehicles”, Agreement No. 419ГССС15-Л/78948 dated 09/08/2022 together with the Innovation Promotion Fund.

For citation: Basenko V.R., Petrov T.I., Ibragimova A.R. Creating a computer model of a synchronous motor for the implementation of the project «Creation of a series of electric motors with a modernized rotor for electric transport of low power». *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (2): 46-54. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-46-54.

Введение (Introduction)

За последнее десятилетие все большую популярность приобрели синхронные машины с постоянными магнитами в виде зубцов (ТС СДПМ). Благодаря своим характеристикам СДПМ могут найти широкое применение в электротранспортных системах. Поэтому именно данный тип электрического двигателя выбран для реализации проекта: «Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для электротранспорта малой мощности». СДПМ находят сегодня широкое применение в различных сферах промышленности, таких как робототехника, электротранспорт малой и средней мощности, автоматизированных системах электропривода. Двигатели типа СДПМ не имеют больших отличий от стандартных синхронных машин.

Научная значимость исследования состоит в использовании постоянных магнитов для создания поля вращающегося узла. Также особенностью данных типов двигателей является подключение к сети, которые не может быть прямым. Главными преимуществами данных двигателей являются:

- снижение времени конструкторских работ;
- уменьшение массо-габаритных характеристик;
- отсутствие механических узлов управления;
- низкое потребление электроэнергии.

Область применения СДПМ сегодня находится в диапазоне систем электропривода до 1МВт. СДПМ могут служить заменой двигателей постоянного тока на коллекторах, в определённых технологических условиях могут быть предпочтительнее асинхронных двигателей и с фазным, и с короткозамкнутым ротором.

Практическая значимость исследования заключается в представлении результатов реализации проекта: «Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для электротранспорта малой мощности» было создано Общество с ограниченной ответственностью «ЛУННЫЙ ЦВЕТОК».

Научная значимость работы заключается в создании генетического алгоритма (ГА) для проведения комплексной топологической оптимизации ротора СДПМ, который имеет представленную далее систему реализации:

- Определение начального (родительского) набора хромосом является случайным. Данный набор может быть разным, но при этом в наборе должна сохраняться четность.

- Алгоритм реализует процедуру скрещивания хромосом (родителей), в результате чего получается новый набор хромосом с новыми характеристиками.

- Из всех имеющихся наборов хромосом крутящего момента двигателя (М) в дальнейший расчет берется два максимальных значения момента. Отобранные хромосомы становятся следующими родительскими наборами.

- Проведение процедуры скрещивания и отбора хромосом с наибольшими значениями крутящего момента двигателя происходят до достижения целей работ, а именно, до определения значения необходимого крутящего момента. Соответственно, от начальной постановки задачи определения крутящего момента будет зависеть количество циклов проведения расчета генетического алгоритма.

Практическая значимость работы заключается в создании компьютерной модели синхронного двигателя с постоянными магнитами мощностью со следующими параметрами:

- 350 Вт, 48 В;
- КПД >75%;
- 40X40X30 см, 12.0 кг.;
- номинальная частота вращения: 450 об/мин;
- номинальная вращающий момент: 7 Н·м.
- номинальный ток загрузки 9,4 А.

Литературный обзор (Literature Review)

Повышение эффективности асинхронных двигателей среди всех типов электродвигателей является наиболее эффективной практикой, поскольку этот тип двигателей потребляет огромную часть всей энергии, поступающей в электродвигатели [1]. Обычно это достигается за счет оптимизации конструкции асинхронных двигателей, что приводит к ограниченному успеху. Альтернативным решением является замена асинхронных двигателей высокоэффективными двигателями с постоянными магнитами (ПМ), которые набирают популярность благодаря существенному снижению цен на постоянные магниты в последние годы. Однако для запуска двигателей с постоянными магнитами требуются инверторы, что неэкономично для многих односкоростных устройств, таких как большинство вентиляторов, насосов и компрессоров, составляющих более 70% применений электродвигателей [3]. Чтобы решить эту проблему, с 1955 года разрабатываются двигатели с постоянными магнитами, оборудованные клетку, так называемые синхронные двигатели с линейным пуском и постоянными магнитами (LS-PMS) [8]. Однако отсутствие постоянных магнитов высокой энергии в прошлом и их высокая цена в дальнейшем помешали широкому использованию двигателей LS-PMS. В последние годы внедрение материалов с постоянными магнитами высокой энергии по разумным ценам проложило путь для двигателей LS-PMS.

Применение СДПМ сегодня является актуальным благодаря их техническим характеристикам. Но высокая стоимость материалов не позволяет в полной мере реализовать все технические возможности данного типа синхронных двигателей. Самым дорогим материалом СДПМ сегодня являются постоянные магниты. Решить данную проблему сегодня можно путем комплексной топологической оптимизации (КТО) конструкции. Методы КТО позволяет оптимизировать конструкцию двигателя с сохранением его технических характеристик, главными из которых являются прочностные, тепловые и электромагнитные характеристики СДПМ. Предлагается использовать современные методы КТО для решения проблемы высокой стоимостью материалов, используемых для изготовления СДПМ [1,2].

Анализ работ современных исследователей [3,4,5] показывает наличие проблемы в области проведения комплексной топологической оптимизации СДПМ, ведь проводя данную процедуру необходимо учитывать электромагнитные, прочностные, тепловые процессы при изменении конструкции двигателя. Также данные процессы коррелируются с конструкцией электротранспорта, в котором применяется тот или иной двигатель.

Существующие методы КТО основаны сегодня на преобразовании конструкции двигателя путем распределения материалов. В частности, если необходимо оптимизировать электромагнитные характеристики двигателя, [1,6,7].

Решение вышеописанной проблемы, анализируя работы авторов [9,10,11] состоит в 3 аспектах:

1. Снижение стоимости конструкции СДПМ за счет изменение параметров используемых постоянных магнитов [12], а именно:

- снижение массы магнитов с сохранением электромагнитных характеристик двигателя с помощью КТО;

- сохранение массы магнитов с улучшением электромагнитных характеристик за счет проведения КТО.

2. Переход от дорогих постоянных магнитов к ферритовым (более низкие энергетические характеристики, но стоимость на 50% меньше). Оптимальное расположение ферритовых магнитов также необходимо определить при помощи комплексная топологическая оптимизация конструкции СДПМ.

3. Оптимизировать конструкцию статора, а именно пазов, с целью оптимального использования токопроводящего материала, и снижения влияния гармонических колебаний.

Материалы и методы (Materials and methods)

Материалы и методы комплексной топологической оптимизации для создания электродвигателя с модернизированным ротором

Решение вопросов оптимизации конструкции электротехнических систем, в частности синхронных двигателей с постоянными магнитами, решаются за счет систем автоматизированного проектирования [1,3,4]. Для эффективной работы таких систем применяются расчетные алгоритмы. Наиболее актуальным и эффективным алгоритмом проведения комплексной топологической оптимизации ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами является генетический алгоритм (ГА). [1,9].

Пример ГА показан на рисунке 1. В этом случае хромосомы для следующего поколения были родительским № 2 и дочерним № 1.

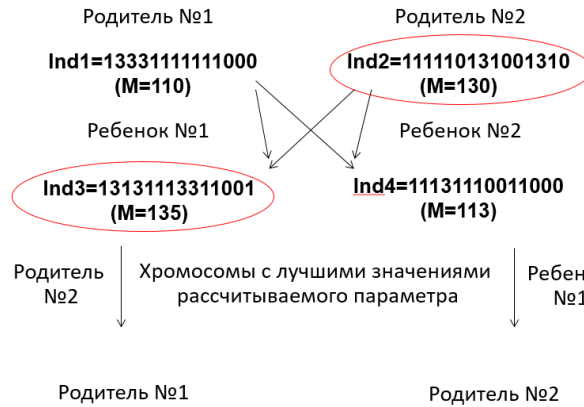


Рис. 1. Схема проведения ГА

Fig.1. Scheme of the GA

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Генетический алгоритм, представленный на рисунке 1, является стандартным для такого типа задач. Для проведения КТО ротора СДПМ его необходимо модернизировать. Главным элементом модернизации представленного ГА будет являться элемент окончания проведения ГА, который осуществляется за счет достижения необходимого значения крутящего момента СДПМ на одной из рассматриваемых хромосом.

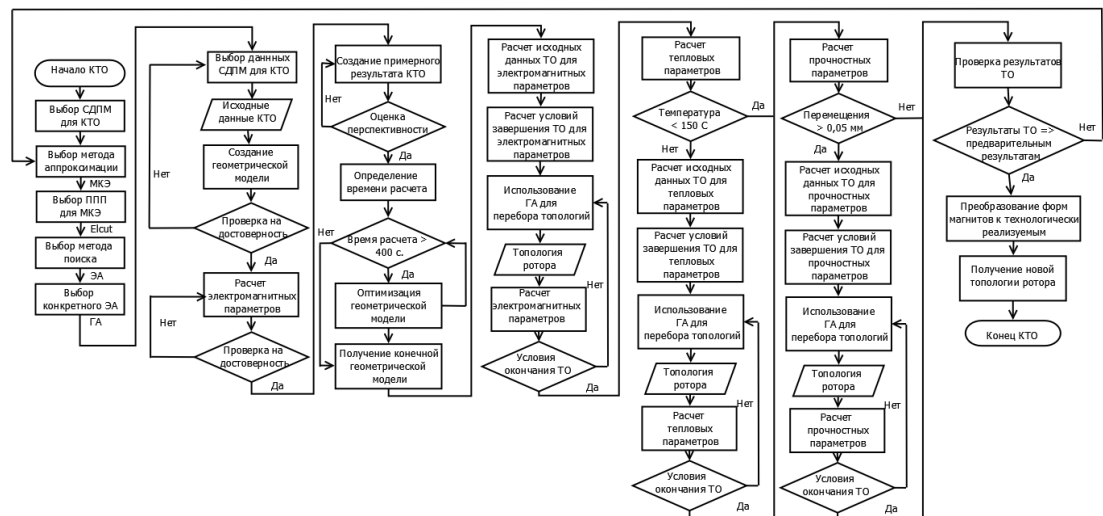


Рис. 2. Генетический алгоритм оптимизации конструкции ротора

Fig. 2. Genetic algorithm for rotor design optimization

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Также рассматриваемой целевой функцией здесь будет служить количество материала постоянных магнитов в статоре СДПМ, что дает возможность снизить объем материала магнитов для снижения себестоимости разрабатываемого электродвигателя.

Результаты (Results)

Результаты реализации проекта: «Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для электротранспорта малой мощности»

Для реализации проекта: «Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для электротранспорта малой мощности» было создано Общество с ограниченной ответственностью «ЛУННЫЙ ЦВЕТОК». 21.09.2022 зарегистрировано Общество с ограниченной ответственностью «ЛУННЫЙ ЦВЕТОК», имеющее следующие выходные данные:

Общество с ограниченной ответственностью «ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "ЛУННЫЙ ЦВЕТОК».

Данное юридическое лицо ориентировано на предоставление услуг потенциальным заказчикам по конструированию и топологической оптимизации СДПМ. Заключение договора о поставке комплектующих для создания образца СДПМ с поставщиками; заключение договора на предоставление услуг по конструированию и топологической оптимизации СДПМ с потенциальными заказчиками.

Получение займа в банке предполагается при возникновении сложностей с возможными инвестициями от потенциальных заказчиков. Организация сети посредников не планируется. Совместное создание агрегатора для реализации с партнерами (потенциальными заказчиками) по модели B2B для реализации полной цепочки производства и реализации электротранспорта малой мощности в России.

Также создана компьютерная модель СДПМ для проведения комплексной топологической оптимизации ротора.

Построена компьютерная модель СДПМ для проведения расчетов электромагнитных характеристик (рис. 3).

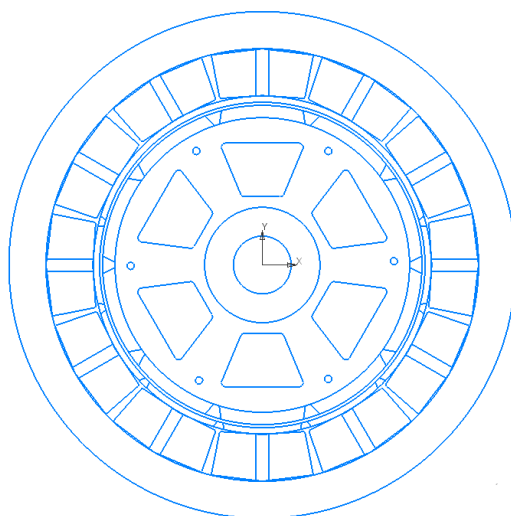


Рис. 3. Компьютерная модель BM1418 ZXF

Fig. 3. Computer model BM1418 ZXF

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Созданная компьютерная геометрическая модель СДПМ загружается в программное обеспечение Elcut. Далее происходит расчет распределения электромагнитного поля, возникающего в роторе с решением сопряжённой задачи расчета момента нагрузки, возникающей на валу ротора. В итоге получено значение в 7,3 Н*м, со среднеквадратичным отклонением в 3,82%. Данная погрешность является допустимой, поэтому модель можно считать верифицированной. Результаты электромагнитных расчетов в программном обеспечении Elcut визуализируются в виде 2D модели продольного разреза ротора, с отображенным распределением электромагнитного поля, что представлено на рисунке 3.

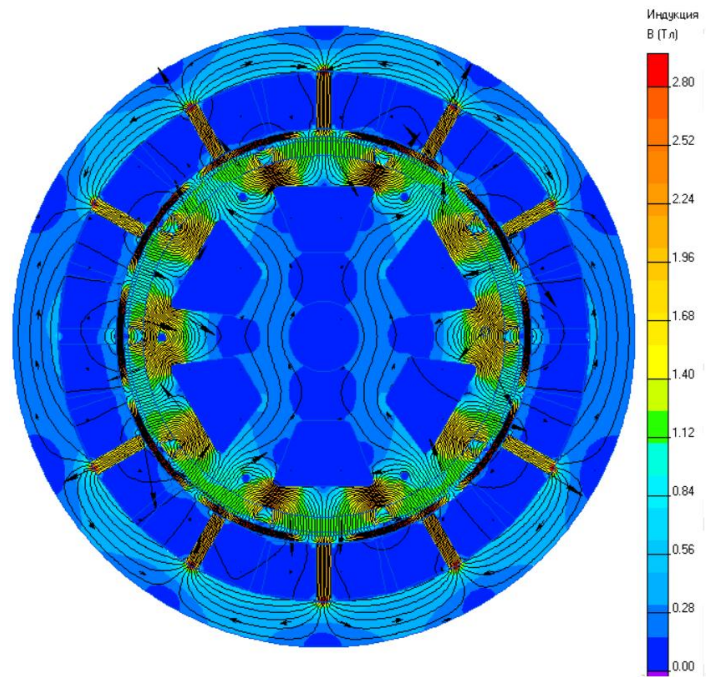


Рис. 4. Результаты электромагнитных расчетов BM1418 ZXF *Fig. 4. BM1418 ZXF Electromagnetic Calculation Results*
Источник: составлено авторами. *Source: compiled by the authors.*

Расчёты одной модели ротора СДПМ составляли 110 с, число элементов сетки составляло 928385 ячеек. Полная итерация шага ГА занимала 150 с времени, при этом проведение полной КТО при самом малом количестве популяций хромосом для многопоточного расчета занимало 12 дней. В дальнейшем для снижения трудоемкости расчетов будут приняты необходимые упрощения конструкции СДПМ.

В результате проведения КТО для СДПМ типа были достигнуты следующие результаты:

- для модернизированного СДПМ объем ПМ составит 9600 мм³;
- снижение объема ПМ составило 32,9 %;
- стоимость магнитов исходного СДПМ составляла 43% от общей стоимости, то после модернизации данный процент составил уже 18%.

Для демонстрации результатов оптимизации проведено сравнение оптимизированного двигателя с существующими аналогами, в частности с BM1418. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

	Исходный СДПМ			Модернизированный СДПМ			
	М _{ср.кв.} , н*М	М _{макс.} , н*М	ω _{ср.кв.} , об/мин	ω _{макс.} , об/мин	М _{ср.кв.} , н*М	М _{макс.} , н*М	ω _{ср.кв.} , об/мин
Опыт №1 (без нагр.)	1,09	1,79	97,22	106,5	1,13	2,42	87,15
Опыт №2 (с нагр.)	1,74	2,49	86,5	96	1,81	2,82	91,5
Опыт №3 (без нагр.)	3,18	4,38	184,84	198	3,31	3,55	190,8
Опыт №4 (с нагр.)	3,88	5,81	192	198	4,01	4,99	191

Источник: составлено авторами. *Source: compiled by the authors.*

Заключение (Conclusions)
Проект «Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для

электротранспорта малой мощности» имеет хороший потенциал для реализации, так как имеется научный задел по созданию СДПМ, имеется поддержка со стороны потенциальных заказчиков и государства. Процесс работы бизнеса - заключение договора с заказчиком о предоставлении услуг по конструированию и оптимизации СДПМ, производства СДПМ и дальнейшая продажа двигателя транспортным и энергетическим предприятиям. Данный бизнес-проект будет устойчив, потому что материалы, комплектующие, программное обеспечение есть в РФ и странах-партнерах (Казахстан, Китай); а направление работы бизнеса соответствует государственным приоритетам, в частности "Транспортной стратегии развития РФ до 2030" и программе «ПСАЛ – 2030».

Данный проект уже нашел интерес у некоторых потребителей и будет устойчив, потому что материалы, комплектующие, программное обеспечение есть в РФ и странах-партнерах (Казахстан, Китай); а направление работы бизнеса соответствует государственным приоритетам, в частности "Транспортной стратегии развития РФ до 2030" и программе «ПСАЛ – 2030». Данная бизнес-идея имеет высокую прибыльность, так как оптимизации СДПМ имеет преимущество в виде снижения стоимости одного СДПМ на 30 %, что дает дополнительную финансовую привлекательность проекту, также данный проект повышает эффективность работы электротранспорта, что является актуальным направлением для транспорта и промышленности РФ.

Теоретическая значимость работы реализована за счет применения генетического алгоритма при проведении комплексной топологической оптимизации двигателя ВМ1418 ZXF, так как получено преимущество в виде снижения стоимости одного СДПМ на 30 %, что дает дополнительную научную и финансовую привлекательность исследованию. Практически данная рассчитанная после оптимизации модель двигателя будет применена на практике, что также повышает эффективность работы электротранспорта, что является актуальным направлением для транспорта и промышленности РФ.

Расчет индекса доходности данного проекта $PI=1,2$ при ставке дисконтирования 10%, при этом инвестиции в 1 млн. рублей принесут порядка 400 тыс. рублей в год чистого денежного потока, дисконтированный срок окупаемости - 2,5 года и текущем объеме рынка 1000 моделей СДПМ в год.

Литература

1. Петров, Т. И. Стенд для измерения вращающего момента и частоты вращения синхронных двигателей с постоянными магнитами / Т. И. Петров, В. Р. Басенко // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике : Материалы XVII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции, Казань, 20–22 октября 2022 года / Редколлегия: А.Г. Арзамасова (отв. редактор). – Казань: ООО "Издательство Фолиант", 2022. – С. 203-206. – EDN KVVYKDF.
2. Разработка макета мобильной установки заряда электротранспорта и стенда для проведения испытаний / А. Р. Сафин, А. Н. Цветков, Т. И. Петров [и др.] // Естественные и технические науки. – 2023. – № 7(182). – С. 138-145. – DOI 10.25633/ETN.2023.07.09. – EDN NZWEGG.
3. Khanchandani K.B., Силовая электроника / K.B. Khanchandani // ISBN: 978-0-07-058389-7 – С. 908-959.
4. Гуляев И.В. Векторное управление синхронным двигателем с постоянными магнитами / И.В. Гуляев, А.В. Волков, А.А. Попов и др. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 5. – С. 187-191.
5. Гуляев И.В. Работа асинхронизированного вентильного двигателя с потреблением чисто активной мощности со стороны якоря/ Тутаев Г.М., Юшков И.С., Волков А.В. // Актуальные проблемы электронного приборостроения труды XII международной конференции: АПЭП-2014. 2014. С. 241-244.
6. Ван Л. Прямое управление моментом для СДПМ / Л. Ван, Ю. Гао // Труды IEEE International Электрические машины и приводы конференция IEMDC. – 2007. – С. 403-406.
7. Гуляев И.В. Электропривод на базе асинхронизированного вентильного двигателя / И.В. Гуляев, А.В. Волков, А.А. Попов и др. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 1. – С. 70-73.
8. Development of an algorithm for the operation of a control station for a mobile electric vehicle charge unit. / A. R. Safin, A. N. Tsvetkov, E. I. Gracheva, T. I. Petrov // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. – 2022. – No. 4(25). – P. 37-44. – EDN FLAYJK.
9. Петров, Т. И. Особенности проектирования синхронных двигателей с постоянными магнитами при помощи комплексной топологической оптимизации / Т. И. Петров, А. Р. Сафин, R. K. Behera // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2023. – Т. 15, № 1(57). – С. 58-67. – EDN KKTGUR.

10. Развитие технологии мобильных зарядных станций для электромобилей / А. Р. Сафин, И. В. Ившин, А. Н. Цветков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 5. – С. 100-114. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-100-114. – EDN YIGCHN.
11. Моделирование работы оборудования мобильной зарядной установки для заряда электротранспорта с целью подтверждения соответствия группам климатического и механического исполнения / Т. И. Петров, А. Р. Сафин, Е. И. Грачева [и др.] // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 365-377. – DOI 10.21443/1560-9278-2022-25-4-365-377. – EDN JILKEG.
12. Firago B. I., Vasil'ev D. S. (2016) Vector Systems Control of Electrical Drives. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 159 (in Russian).
13. Сафин, А. Р. Оптимизация модели синхронного двигателя с постоянными магнитами для снижения времени расчета вращающего момента / А. Р. Сафин, Т. И. Петров // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. – 2021. – № 3(20). – С. 31-37. – EDN TBKBRC.
14. Laser Control and Measuring Complex for Non-contact Vibration Control of the Power Transformer Technical Condition / V. Basenko, O. Vladimirov, I. Ivshin [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 190. – P. 157-167. – DOI 10.1007/978-3-030-86047-9_17. – EDN EIGGGZ.
15. 3D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам / В. Р. Басенко, М. Ф. Низамиев, И. В. Ившин, О. В. Владимиров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 130-143. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143. – EDN TTLTLL.

Авторы публикации

Басенко Василий Романович – преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Петров Тимур Игоревич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Ибрагимова Айгуль Равиелевна – аспирант Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Petrov, T. I. Stand for measuring the torque and rotational speed of synchronous motors with permanent magnets / T. I. Petrov, V. R. Basenko // Dispatch and control in the electric power industry: Proceedings of the XVII All-Russian Open Youth Scientific and Practical Conference, Kazan, October 20–22, 2022 / Editorial Board: A.G. Arzamasova (responsible editor). – Kazan: LLC "Publishing House Foliant", 2022. – S. 203-206. – EDN KVKYKDF.
2. Safin A. R., Tsvetkov A. N., Petrov T. I. [et al.] Development of a model of a mobile electric transport charge unit and a test bench // Natural and technical sciences. – 2023. – No. 7 (182). – S. 138-145. – DOI 10.25633/ETN.2023.07.09. – EDN NZWEGG.
3. Khanchandani K.B., Power electronics / K.V. Khanchandani // ISBN: 978-0-07-058389-7 - pp. 908-959.
4. Gulyaev I.V. Permanent Magnet Synchronous Motor Vector Control / I.V. Gulyaev, A.V. Volkov, A.A. Popov and others // Scientific and technical bulletin of the Volga region. – 2015. – No. 5. – P. 187-191.
5. Gulyaev I.V. The operation of an asynchronized brushless motor with the consumption of purely active power from the armature / Tutaev G.M., Yushkov I.S., Volkov A.V. // Actual problems of electronic instrumentation, Proceedings of the XII International Conference: APEP-2014. 2014. S. 241-244.
6. Wang L. Direct torque control for PMSM / L. Wang, Yu. Gao // Proceedings of IEEE International Electrical Machines and Drives Conference IEMDC. – 2007. – S. 403-406.
7. Gulyaev I.V. Electric drive based on asynchronized valve motor / I.V. Gulyaev, A.V. Volkov, A.A. Popov and others // Scientific and technical bulletin of the Volga region. – 2015. – No. 1. – S. 70-73.
8. Development of an algorithm for the operation of a control station for a mobile electric vehicle charge unit. / A. R. Safin, A. N. Tsvetkov, E. I. Gracheva, T. I. Petrov // Bulletin of PITTU named after academician M.S. Osimi. – 2022. – No. 4(25). – P. 37-44. – EDN FLAYJK.
9. Petrov, T. I., Safin, A. R., and Behera, R. K. Design features of permanent magnet synchronous motors using complex topological optimization, Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. – 2023. – T. 15, No. 1 (57). – S. 58-67. – EDN KKTGUR.
10. Development of the technology of mobile charging stations for electric vehicles / A. R. Safin, I. V. Ivshin, A. N. Tsvetkov [et al.] // News of higher educational institutions. Energy problems. – 2021. – T.

23, No. 5. - S. 100-114. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-100-114. – EDN YIGCHH.

11. Petrov T.I., Safin A.R., Gracheva E.I. [et al.] Modeling the operation of equipment for a mobile charging installation for charging electric vehicles in order to confirm compliance with climatic and mechanical performance groups // Bulletin of MSTU. Proceedings of the Murmansk State Technical University. - 2022. - T. 25, No. 4. - S. 365-377. – DOI 10.21443/1560-9278-2022-25-4-365-377. – EDN JILKEG.

12. Firago B. I., Vasil'ev D. S. (2016) Vector Systems Control of Electrical Drives. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 159 (in Russian).

13. Safin, A. R. Optimization of the model of a synchronous motor with permanent magnets to reduce the time for calculating the torque / A. R. Safin, T. I. Petrov // Bulletin of PITTU named after academician M.S. Osimi. - 2021. - No. 3 (20). - S. 31-37. – EDN TBKBRC.

14. Laser Control and Measuring Complex for Non-contact Vibration Control of the Power Transformer Technical Condition / V. Basenko, O. Vladimirov, I. Ivshin [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. - 2022. - Vol. 190. - P. 157-167. – DOI 10.1007/978-3-030-86047-9_17. – EDN EIGGGZ.

15. Basenko, V.R., Nizamiev, M.F., Ivshin, I.V., and Vladimirov, O.V., 3D model of a power transformer for the study of its technical condition in terms of vibrational parameters, Izv. Energy problems. - 2022. - T. 24, No. 3. - S. 130-143. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143. – EDN TTLTL.

Authors of the publication

Vasily R. Basenko - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Timur I. Petrov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Aigul R. Ibragimova - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)

Получено 07.02.2024 г.

Отредактировано 19.02.2024 г.

Принято 21.02.2024 г.

ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ И ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ MATLAB

Саттаров Р.Р.¹, Гарафутдинов Р.Р.²

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия

²Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

garafutdinov_r_r@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. В настоящее время ввод в эксплуатацию электростанций на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с применением инверторов получает широкое распространение. Однако эти электростанции не участвуют в поддержании устойчивости энергосистемы при аварийных возмущениях, так как отключаются технологическими защитами при возникновении возмущения. В будущем, когда электростанции на основе ВИЭ получат широкое распространение обеспечение возможности их участия в поддержании устойчивости позволит существенно повысить надежность энергосистемы. Предварительную оценку эффективности участия в поддержании устойчивости необходимо выполнять путем компьютерного моделирования. ЦЕЛЬ. Реализовать возможность участия электростанций на основе ВИЭ в обеспечении надежной и устойчивой работы энергосистемы, а также реализовать возможность выполнения предварительной оценки эффективности предлагаемого метода. МЕТОДЫ. В данной работе предлагается применение технологии виртуального синхронного генератора для реализации возможности участия электростанций на основе ВИЭ в обеспечении надежности и устойчивости энергосистемы. Также предлагается способ моделирования виртуального синхронного генератора в программном комплексе Matlab. РЕЗУЛЬТАТЫ. Предложена технология виртуального синхронного генератора, которая с использованием инвертора, накопителя электрической энергии и соответствующей системы управления может обеспечить повышение динамической устойчивости энергосистемы. Предложен способ моделирования виртуального синхронного генератора в программном комплексе Matlab. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что построенная модель виртуального синхронного генератора эффективна, сохраняет устойчивость системы и обеспечивает корректное управление инвертором, вследствие чего параметры электрической сети поддерживаются в допустимых пределах. Полученная компьютерная модель может использоваться в дальнейших исследованиях. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Технология виртуального синхронного генератора позволяет воспроизводить в инверторе инерционный и демпфирующий отклик традиционного синхронного генератора, а предложенная компьютерная модель поможет оценить эффективность применения данной технологии при внедрении в энергосистему.

Ключевые слова: виртуальный; синхронный; генератор; инвертор; устойчивость; солнечные; электростанции; ВИЭ; компьютерное моделирование; Matlab.

Для цитирования: Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р. Применение виртуального синхронного генератора в энергосистемах и его моделирование в программном комплексе Matlab // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 55-67. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-55-67.

APPLICATION OF VIRTUAL SYNCHRONOUS GENERATOR TECHNOLOGY IN POWER SYSTEMS AND ITS MODELING IN THE MATLAB SOFTWARE PACKAGE

Sattarov¹ R.R., Garafutdinov² R.R.

¹Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

²Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

garafutdinov_r_r@mail.ru

Abstract: Currently, the commissioning of power plants based on renewable energy sources (RES) using inverters is becoming widespread. However, these power plants do not participate in maintaining the stability of the power system during emergency disturbances, since they are switched off by technological protections when a disturbance occurs. In the future, when power plants based on renewable energy sources become widespread, ensuring the possibility of their participation in maintaining sustainability will significantly increase the reliability of the energy system. A preliminary assessment of the effectiveness of participation in maintaining sustainability should be carried out through computer modeling. **THE PURPOSE:** To realize the possibility of participation of RES-based power plants in ensuring reliable and sustainable operation of the power system, as well as to realize the possibility of performing a preliminary assessment of the effectiveness of the proposed method. **METHODS.** In this paper, the application of virtual synchronous generator technology is proposed to realize the possibility of participation of RES-based power plants in ensuring the reliability and sustainability of the power system. Also, a method of modeling the virtual synchronous generator in Matlab software package is proposed. **RESULTS.** The technology of virtual synchronous generator is proposed, which with the use of inverter, electric energy storage and appropriate control system can provide the increase of dynamic stability of power system. A method of modeling the virtual synchronous generator in Matlab software package is proposed. The results obtained allow us to conclude that the constructed model of a virtual synchronous generator is efficient, maintains the stability of the system and ensures correct control of the inverter, as a result of which the parameters of the electrical network are maintained within acceptable limits. The resulting computer model can be used in further research. **CONCLUSION.** The technology of virtual synchronous generator allows to imitate in the inverter the inertial and damping characteristics of the traditional synchronous generator, and the proposed computer model will help to evaluate the effectiveness of this technology when implemented in the power system.

Keywords: virtual; synchronous; generator; inverter; stability; solar; power plants; RES; computer simulation; Matlab.

For citation: Sattarov R.R., Garafutdinov R.R. Application of virtual synchronous generator technology in power systems and its modeling in the Matlab software package. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (2): 55-67. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-55-67.

Введение (Introduction)

На сегодняшний день развитие силовой электроники нашло применение практически в каждой отрасли, и электроэнергетика не исключение. Большое количество электростанций на основе возобновляемых источников энергии имеют в своем составе полупроводниковый преобразователь [1]. Как правило, такие электростанции имеют небольшую относительно традиционных электростанций мощность, при этом совокупность маломощных электростанций в энергосистеме влияет на ее устойчивость [2].

Одной из важнейших задач развития энергосистем является обеспечение ее устойчивости при различных аварийных возмущениях. Нарушение устойчивости крупной энергосистемы сказывается на всех ее потребителях и влечет за собой множество негативных последствий (экономических, социальных и др.). Тяжелые последствия указанных аварий вынуждают задуматься об обеспечении устойчивости уже на стадии проектирования электрических сетей путем разработки и применения мер по повышению устойчивости. [3]. Вопросы повышения устойчивости значительно повлияли на проектируемые схемы выдачи мощности электростанций, проекты развития электрических сетей, в том числе к вводимым в последние годы электростанциям на основе ВИЭ [4].

Данная статья посвящена исследованию применения технологии виртуального синхронного генератора (ВСГ) в электроэнергетических системах. В рамках статьи был описан основной принцип работы ВСГ, а также структурная схема управления ВСГ.

Для выполнения исследования была разработана компьютерная модель упрощенной электрической сети, которая состоит из солнечной электростанции, ЛЭП выдачи мощности солнечной электростанции и потребителей. Построенная сеть работает изолированно. После чего в схеме управления инвертором был реализован

алгоритм ВСГ. Также приведены результаты расчетов на разработанной компьютерной модели и выполнен анализ полученных результатов.

Применение технологии ВСГ может обеспечить участие электростанций на основе ВИЭ в повышении устойчивости энергосистемы, что в будущем при широком распространении таких электростанций обеспечит надежную и устойчивую работу энергосистем.

Целью исследования является реализация возможности участия электростанций на основе ВИЭ в обеспечении надежной и устойчивой работы энергосистемы, а также реализовать возможность выполнения предварительной оценки эффективности применения ВСГ в электроэнергетических системах.

Научная значимость исследования заключается в разработке цифровой математической модели в среде MATLAB. Математическая модель разработана для исследования динамической устойчивости энергосистемы при внедрении в нее электростанций ВИЭ с применением ВСГ. Разработанная математическая модель в будущем может использоваться как основа для дальнейших всесторонних исследований влияния ВСГ на динамическую устойчивость при работе в составе энергосистем.

Научная новизна исследования заключается в разработке математической модели, которая, в отличие от приведенных в научной литературе, обладает большой гибкостью и позволяет путем изменения параметров элементов адаптировать разработанную математическую модель под особенности любой электрической сети, а разнесение основных функций модели по разным блокам дает возможность заменять и модернизировать их отдельно от остальных функций системы управления.

Практическая значимость исследования заключается в том, что использование результатов, полученных в настоящей работе, может послужить отправной точкой при дальнейших исследованиях, что в последствии позволит реализовать возможность участие электростанций ВИЭ в повышении динамической устойчивости энергосистем.

Литературный обзор (Literature Review)

Подробное описание ВСГ приведено в работах [5,6]. Авторы статьи уделили большое внимание теории ВСГ, в основе которого лежит уравнение движения ротора синхронного генератора, а также возможные варианты их реализации.

Классификация существующих алгоритмов ВСГ наиболее наглядно представлена в работе [7]. Авторы разделили существующие алгоритмы ВСГ на следующие группы: алгоритмы, основанные на модели синхронного генератора, основанные на уравнении качания и основанные на связи мощности и частоты.

В алгоритме управления, относящегося к первой группе, используется математическая модель синхронного генератора. Недостатком первой группы алгоритмов является сложность дифференциальных уравнений синхронной машины.

В алгоритмах управления, относящихся ко второй группе вместо полной модели синхронной машины, используются уравнения качаний, что также приводит к сложностям при их решении.

Третья группа алгоритмов управления является наиболее упрощенной, однако, при наличии нескольких таких объектов в энергосистеме возникают неустойчивые колебания.

Авторы в работе [8] выделяют системы управления на основе ВСГ в следующие группы: управляемые по напряжению и управляемые по току, а также приводят особенности работы каждой группы систем управления. В своей статье авторы приходят к выводу, что система, управляемая по току, не во всех случаях обеспечивает корректное управление, поэтому система, управляемая по напряжению, более предпочтительна.

Чаще всего в работах рассматривается применение ВСГ в слабых распределительных сетях [9,10] с возможностью отделения на изолированную работу при аварийных ситуациях [11,12], а также рассматриваются дополнительные методы обеспечения надежности. Так, в работах [13,14] авторы предлагают совместить ВСГ с накопителем электрической энергии для обеспечения надежности электроснабжения потребителей при отделении их на изолированную нагрузку.

Способы моделирования ВСГ в программных комплексах приведены в работах [15-17]. Основная сложность при моделировании ВСГ заключается в настройке коэффициентов инерции и степени демпфирования, так как при выборе указанных значений учитываются свойства электрической сети, к которой подключается ВСГ.

Влияние электростанций ВИЭ с применением ВСГ на динамическую устойчивость электрической сети при работе совместно с традиционными синхронными генераторами требует углубленных исследований.

Виртуальный синхронный генератор (Virtual Synchronous generator)

В России исторически сформировалась традиционная структура генерирующих мощностей, которая в большинстве своем включает в себя генераторы с относительно

большой единичной мощностью, что в свою очередь влечет за собой и большую инерцию вращения и кинетическую энергию. В случае возникновения аварии в энергосистеме высокая кинетическая энергия роторов генераторов «поддерживает» энергосистему, сохраняя ее устойчивость. В дополнение к высоким значениям инерции роторов синхронные генераторы имеют демпфирующую функцию, что помогает демпфировать колебания частоты в энергосистемах [18]. При сохранении текущих темпов развития ВИЭ в будущем доля электростанций на основе ВИЭ в общей величине установленной мощности будет расти и будет сопоставима с мощностью генераторов на традиционных электростанциях. При этом, из-за отсутствия вращающихся масс электростанции ВИЭ не будут вносить вклад в повышение устойчивости энергосистемы (при текущих системах управления) [19,20]. Таким образом, аварийные возмущения в энергорайонах с большой долей электростанций ВИЭ будут значительно тяжелее, чем в энергорайонах с малой долей электростанций ВИЭ.

Однако, если добавить к инвертору накопитель энергии, тогда возможно реализовать алгоритм ВСГ путем перенастройки системы управления инвертором [21,22]. В результате электростанции ВИЭ могут вести себя как традиционный генератор в течение некоторого времени и вносить свой вклад в повышение устойчивости энергорайона [23].

ВСГ имеет возможность имитировать инерционные свойства традиционных синхронных генераторов ограниченный период времени с помощью дополнительно реализованных алгоритмов управления, тем самым давая традиционно построенным системам регулирования, устройствам противоаварийного управления и релейной защите достаточно времени для возвращения параметров электрической сети в область допустимых значений, тем самым повышая предел устойчивости энергосистемы [24].

Основной принцип работы ВСГ (The basic principle of the VSG)

Принцип ВСГ основан на воспроизведении динамических свойств реального синхронного генератора на электростанциях с ВИЭ с применением инверторов. Динамические свойства синхронных генераторов обеспечивают возможность регулировки активной и реактивной мощности, зависимости частоты сети от частоты вращения ротора, эффекта вращающейся массы и демпфирования обмоток. Это достигается за счет активного регулирования мощности инвертора в обратной пропорции к частоте вращения ротора [25].

ВСГ включает в себя систему из следующих элементов: инвертор, алгоритм управления инвертором и накопителя электрической энергии (рис. 1). Система регулирует выдачу мощности инвертора в энергосистему, тем самым демпфируя колебания частоты так, как это делает традиционный синхронный генератор [26,27]. В связи с тем, что ВСГ должен иметь возможность в любое время увеличивать выдачу или уменьшать выдачу мощности, накопитель электрической энергии должен всегда иметь резерв на загрузку и разгрузку для компенсации недостатка или избытка энергии при аварийных ситуациях [28].

Для лучшего понимания структуры ВСГ на рис.1 проведена аналогия солнечной электростанции с применением ВСГ с традиционным генератором тепловой электростанции.

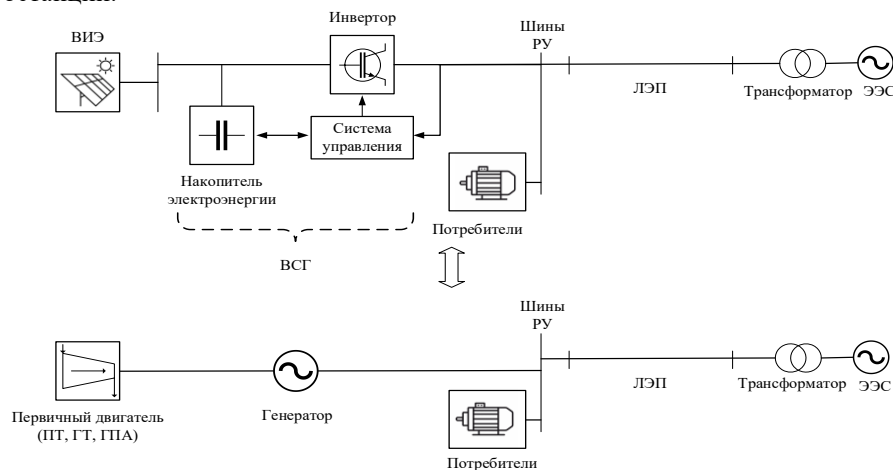


Рис. 1. Структура ВСГ и аналогия между солнечной электростанцией и традиционной электростанцией с синхронным генератором

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 1. The structure of the VSG and the analogy between a solar power plant and a traditional power plant with a synchronous generator

Согласно рисунку 1, аналогия между инвертором и синхронным генератором может быть описана в следующем виде [29]:

- фотоэлектрические установки выполняют функции паровой (газовой) турбины;
- система накопления энергии и инвертор моделируют вращающуюся инерцию турбины и генератора;
- алгоритм управления моделирует электромеханические преобразования энергии традиционного синхронного генератора [30].

В качестве основного элемента ВСГ используется уравнение качания синхронного генератора, которое имеет вид [3]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_r), \quad (1)$$

где D - коэффициент демпфирования, J - момент инерции ротора, T_m - электромагнитный момент генератора, T_e - механический момент генератора, ω - угловая частота сети и ω_r - заданная угловая частота.

Для имитации электромагнитных характеристик синхронного генератора для ВСГ электрическое уравнение статора синхронного генератора может моделироваться без учета электромагнитной взаимосвязи между статором и ротором и может быть выражено как [23]:

$$\begin{aligned} L_s \frac{di_a}{dt} &= e_a - v_a - Ri_a; \\ L_s \frac{di_b}{dt} &= e_b - v_b - Ri_b; \\ L_s \frac{di_c}{dt} &= e_c - v_c - Ri_c, \end{aligned} \quad (2)$$

где L_s - индуктивность статора, $v_{a(b,c)}$ - напряжение в точке подключения, $e_{a(b,c)}$ - электродвижущая сила, R - сопротивление статора.

Для расчета опорной фазы и частоты модулирующего сигнала контур активной мощности ВСГ имитирует первичное регулирование частоты, демпфирование и инерцию синхронного генератора. В качестве основного элемента ВСГ используется уравнение качания синхронного генератора, которое имеет вид [3]:

$$P_m - P_e = \left(J \frac{d\omega}{dt} + D(\omega - \omega_r) \right) \omega, \quad (3)$$

где P_m - входная мощность инвертора (исходная мощность источника), P_e - выходная электрическая мощность инвертора. Для поддержания скорости ВСГ равной частоте сети важную роль играет виртуальный коэффициент демпфирования [23].

Математическое уравнение для контура активной мощности ВСГ, включая простой регулятор ВСГ, можно получить из (3):

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D(\omega - \omega_r). \quad (4)$$

Уравнение для контура реактивной мощности ВСГ позволяет определить необходимый уровень ЭДС E_r [3]:

$$K \frac{dE_r}{dt} = Q_m - Q_e + k_q (V_r - V), \quad (5)$$

где K - коэффициент инерции реактивной мощности и напряжения контура реактивной мощности, Q_m - заданная реактивная мощность, Q_e - выходная реактивная мощность;

k_q – коэффициент снижения реактивной мощности и напряжения; V – амплитуда выходного напряжения, а V_r – амплитуда номинального напряжения [31].

Материалы и методы (Materials and methods)

На основании вышеизложенного авторами был разработан способ моделирования ВСГ в программном комплексе Matlab.

Расчетная компьютерная модель состоит из:

- Источника постоянного напряжения, моделирующего ВИЭ;
- Инвертора;
- Схемы управления инвертором, реализующей алгоритм ВСГ;
- Модели ЛЭП;
- Двух нагрузок, одна из которых подключена постоянно, а другая подключается через 0,4 секунды после начала моделирования. Данное решение требуется для моделирования небаланса нагрузки в системе;
- Измерительных приборов.

Расчетная модель приведена на рисунке 2.

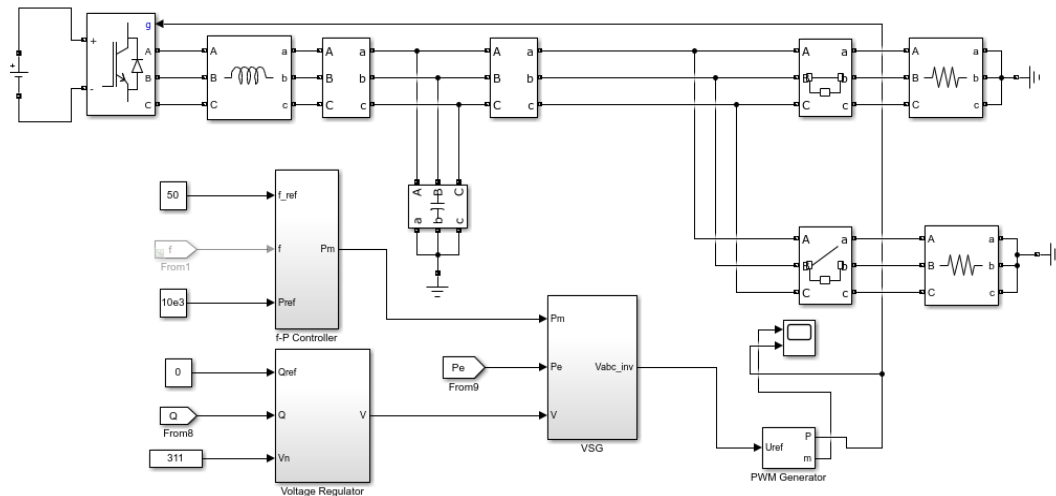


Рис.2. Расчетная модель в программном комплексе Matlab

Fig.2. Calculation model in the Matlab

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В приведенной схеме реализация принципа ВСГ выполнена в схеме управления [32]. Для этого авторами были разработаны следующие блоки:

- Регулятор активной мощности и частоты (f-P Controller);
- Регулятор напряжения (Voltage Regulator);
- Блок, моделирующий инерционные свойства синхронного генератора (VSG).

Для формирования сигналов переключения ключей инвертора использовался имеющийся в библиотеке Matlab Simulink блок ШИМ-генератор (PWM Generator). Вышеуказанные блоки формируют собой схему управления инвертором.

Регулятор активной мощности и частоты приведен на рис. 3.

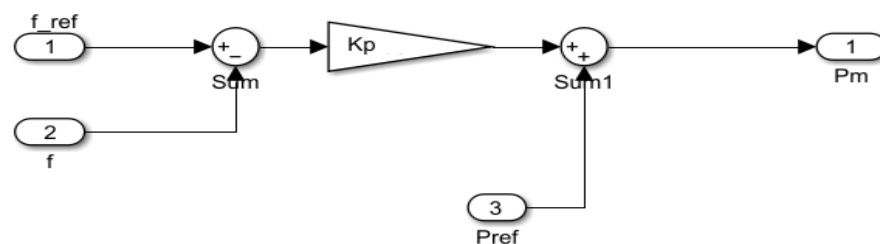


Рис. 3. Регулятор активной мощности и частоты

Fig. 3. Active power and frequency controller

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Регулятор отслеживает отклонение заданной частоты от фактической и, при расхождении, формирует сигнал ошибки. Полученная ошибка складывается с заданной активной мощностью, и результирующая активная мощность передается на блок, моделирующий инерционные свойства синхронного генератора.

Регулятор напряжения приведен на рисунке 4.

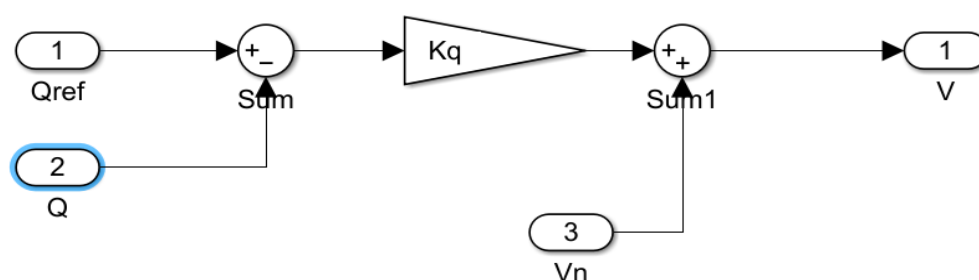


Рис. 4. Регулятор напряжения

Fig. 4. Voltage regulator

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Блок, моделирующий инерционные свойства синхронного генератора основан на уравнении движения ротора синхронного генератора (3) и приведен на рисунке 5.

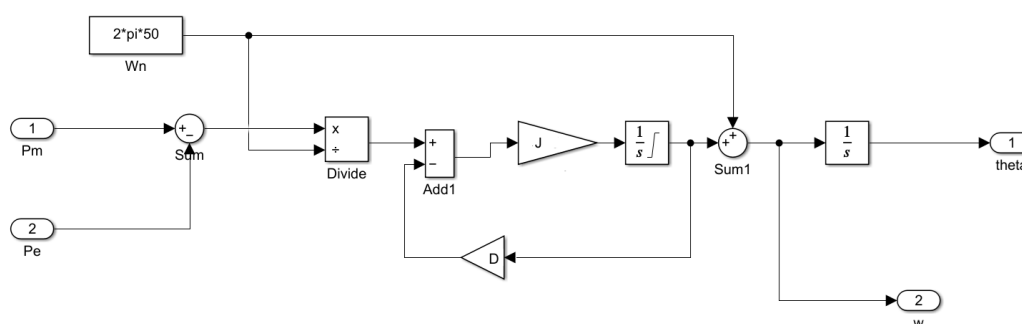


Рис. 5. Блок, моделирующий инерционные свойства синхронного генератора

Fig. 5. A block simulating the inertial properties of a synchronous generator

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Основные параметры вышеописанных блоков компьютерной модели приведены в таблице.

Таблица
Table

Основные параметры блоков компьютерной модели
Main parameters of computer model blocks

Наименование параметра	Значение параметра
Регулятор активной мощности и частоты (f-P Controller)	
Номинальная частота, Гц	50
Номинальная активная мощность, Вт	1000
Коэффициент усиления K_p , о.е.	10000
Регулятор напряжения (Voltage Regulator)	
Номинальное напряжение (фазное), В	311
Номинальная активная мощность, вар	0
Коэффициент усиления K_q , о.е.	0.0001
Блок, моделирующий инерционные свойства синхронного генератора (VSG)	
Момент инерции J , о.е.	0,5
Коэффициент демпфирования D , о.е.	20

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В приведенной расчетной модели применены некоторые упрощения, а именно отсутствует накопитель электрической энергии, который необходим для выдачи дополнительной энергии или ее приема (в зависимости от сложившегося аварийного режима) при моделировании инерционных и демпфирующих свойств синхронного генератора. Вместо генерации ВИЭ и накопителя электрической энергии применен источник постоянного напряжения. Моделирование генерации ВИЭ и накопителя электрической энергии будет выполняться в рамках расширения расчетной модели в будущем.

Разработанная математическая модель обладает большой гибкостью и позволяет адаптировать ее под условия различных электрических сетей, а разнесение основных

функций модели по разным блокам дает возможность заменять и модернизировать их отдельно от остальных функций системы управления.

Для проверки работоспособности построенного алгоритма ВСГ проведено компьютерное моделирование по оценке возможности сохранения устойчивости сети при аварийном небалансе мощности, а именно резкое увеличение нагрузки и последующее снижение нагрузки до начальной величины.

Моделирование проводилось по следующему сценарию:

- 1) Пуск моделирования;
- 2) Возникновение аварийного небаланса мощности в сети (увеличение нагрузки) при $t=0,4$ с;
- 3) Возникновение повторного аварийного небаланса мощности (снижение нагрузки до начальной величины) при $t=0,8$ с.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Результаты моделирования приведены на рисунках 6, 7 и 8.

Из графика изменения напряжения (рис. 6) следует, что напряжение поддерживается инвертором на постоянном уровне.

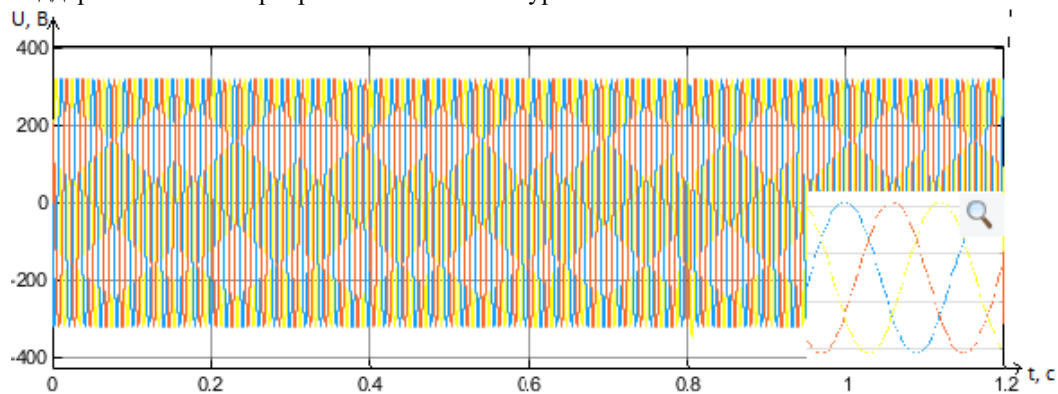


Рис. 6. График зависимости напряжения на выходе инвертора от времени

Fig. 6. Graph of the dependence of the voltage at the output of the inverter on time

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из графика изменения тока (рис. 7) видно, что инвертор реагирует на возникновение небалансов в сети (резкое увеличение/снижение потребления).

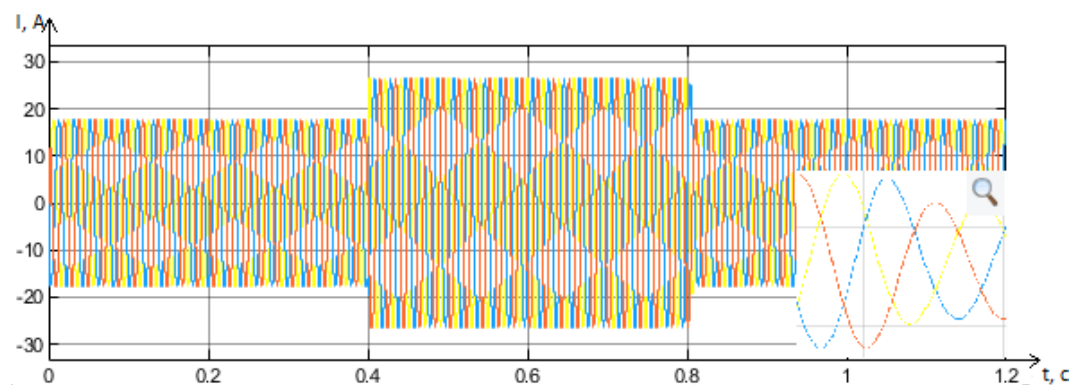


Рис. 7. График зависимости тока на выходе инвертора от времени

Fig. 7. Graph of the dependence of the current at the output of the inverter on time

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из графика изменения частоты (рис. 8) видно, что отклонения частоты при возникающих небалансах незначительны.

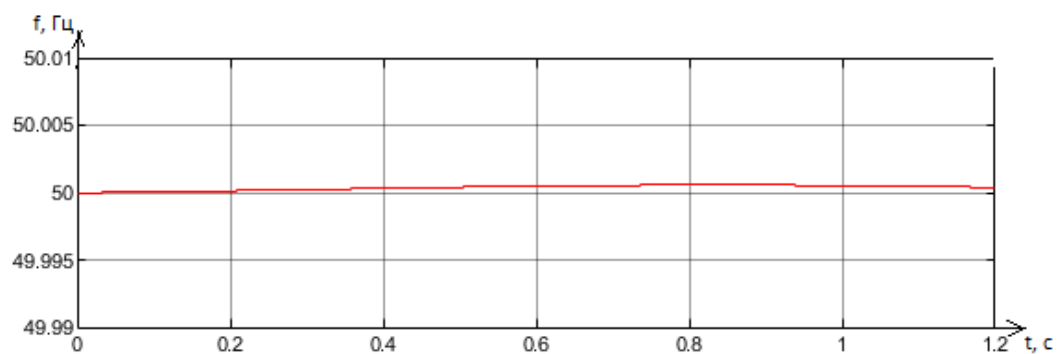


Рис. 8. График зависимости напряжения на выходе инвертора от времени *Fig. 8. Graph of the dependence of the voltage at the output of the inverter on time*

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author*

Из полученных в ходе моделирования графиков видно, что напряжение на выходе инвертора при возникновении аварийного небаланса мощности поддерживается на постоянном уровне (рис. 6). Ток на выходе инвертора увеличивается в момент наброса нагрузки и снижается в момент сброса нагрузки (рис.7), поддерживая частоту на постоянном уровне (рис.8) и обеспечивая потребность в электроэнергии. При этом отклонение частоты от заданных 50 Гц незначительно.

На основании полученных результатов моделирования можно сделать вывод о том, что построенная модель ВСГ эффективна, сохраняет устойчивость системы и обеспечивает корректное управление инвертором, вследствие чего параметры электрической сети поддерживаются в допустимых пределах.

Заключение (Conclusions)

Технология ВСГ может обеспечить участие электростанций на основе ВИЭ в повышении устойчивости энергосистемы, что в будущем при широком распространении таких электростанций обеспечит надежную и устойчивую работу энергосистем. Вклад в повышение устойчивости электрической сети реализуется путем имитации в инверторе инерционных и демпфирующих характеристик традиционного синхронного генератора, что повышает устойчивость энергосистемы и позволяет эффективно внедрять большое количество электростанций с использованием инверторов.

Полученная компьютерная модель в дальнейшем может использоваться в исследовании влияния электростанций ВИЭ с ВСГ на устойчивость в электрической сети с традиционными электростанциями, а также влияние на устойчивость при увеличении количества ВИЭ с ВСГ в электрической сети.

Литература

1. Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р. Технология виртуального синхронного генератора для повышения устойчивости энергосистем // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. ст. науч.-техн. конф./Нижегород. гос. техн.ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2021. – 435 с.
2. Шерязов С.К., Исенов С.С., Исаков Р.М., и др. Основные типы ветротурбин-генераторов в системе электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т.23. № 5. С. 24-33.
3. Cheema K.M. A comprehensive review of virtual synchronous generator // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 120.
4. Chen M., Zhou D., Blaabjerg F. Modelling, implementation, and assessment of virtual synchronous generator in power systems //Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. – 2020. – Т. 8. – №. 3. – С. 399-411.
5. Sakimoto K., Miura Y., Ise T. Stabilization of a power system with a distributed generator by a Virtual Synchronous Generator function // 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, 2011, pp. 1498-1505.
6. Зацаринная Ю.Н., Реутин Г.В., Курилов С.С., и др. Прогнозирование выработки электроэнергии фотоэлектрической станции методами машинного обучения. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т. 25. № 3. С. 81–92.
7. Бурмейстер М. В., Булатов Р. В., Блинова К. А. Применение систем виртуальной инерции для улучшения качества переходных процессов в электроэнергетических системах // Фёдоровские чтения — 2021 : LI международная научно-практическая конференция с элементами

научной школы, Москва, 17–19 ноября 2021 года. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2021. – С. 318-324.

8. Аскарлов А.Б., Суворов А.А., Андреев М.В., Гусев А.С. К вопросу о современных принципах управления возобновляемыми источниками энергии на основе виртуального синхронного генератора. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2022. № 41. С. 5-30.

9. Mallemaci V., Mandrile F., Rubino S. et al. A comprehensive comparison of Virtual Synchronous Generators with focus on virtual inertia and frequency regulation //Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 201. pp. 107516.

10. Sang W., Guo W., Dai S., et al. Virtual synchronous generator, a comprehensive overview //Energies. 2022. Vol. 15. N17. pp. 6148.

11. Kong, X., Pan, J., Gong, X., et al. Emulating the features of conventional generator with virtual synchronous generator technology: an overview // The Journal of Engineering, 2017. Vol. 13, pp. 2135–2139.

12. Сардалов Р.Б., Ельмурзаев А.А., Дебиев М.В., и др. Перспективы развития традиционной и нетрадиционной энергетики Чеченской Республики. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23 № 4. С. 134-144.

13. Hirase Y., Ohara Y., Bevrani H. Virtual synchronous generator-based frequency control in interconnected microgrids //Energy Reports. 2020. Vol. 6. pp. 97-103.

14. Lin C., Xiao L., Sattarov R. Power System Control of More-electric Aircraft Engine Based on Double Closed Loop Feedback. 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), 2019, pp. 1-6.

15. Robert F., Roger C. Review of the Impacts of Distributed Generation on Distribution Protection. 2015 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC); 2015. pp. 69-74. doi: 10.1109/REPC.2015.12

16. Лукутин Б.В., Карпар Хамид А. Оптимизация энергетических балансов фотоэлектрической станции с электрохимическим и тепловым аккумулированием солнечной энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 3-13.

17. Гарафутдинов Р.Р., Саттаров, Р.Р. Моделирование усовершенствованной автоматики ограничения перегрузки оборудования // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2020. Т. 20. № 1. С.30–37.

18. Sattarov R., Fedosov E., Garafutdinov R. et al., Application of PSCAD in Practical Studies of Electrical Power Engineering Student // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), 2019, pp. 1-6.

19. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Исследование режимов работы изолированной системы электроснабжения с управляемыми установками распределенной генерации, накопителями электроэнергии и двигательной нагрузкой // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 5. С. 184-194.

20. Бурмейстер М.В., Булатов Р.В., Кочергин А.В., и др. Применение виртуальной синхронной машины для интеграции возобновляемых источников энергии в объединённые энергосистемы // Научное сообщество студентов: междисциплинарные исследования: сб. ст. по мат. LXXIV междунар. студ. науч.-практ. конф. № 15(74).

21. Колпаков А.И. Конденсаторы Electronicon для высоковольтных преобразовательных устройств // Компоненты и технологии, 2004 г. № 6. С. 22-25.

22. Abuagreb M., Allehyani M. F., Johnson B. K. Overview of Virtual Synchronous Generators: Existing Projects, Challenges, and Future Trends //Electronics. – 2022. – Vol. 11, N18. pp. 2843.

23. Zhong Q-C, Weiss G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators // IEEE Trans Industr Electron. 2010. Vol. 58, N4. pp.1259–1267.

24. Lou G., Yang Q., Gu W., et al. An improved control strategy of virtual synchronous generator under symmetrical grid voltage sag //International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 121. pp 106093.

25. Li L., Li H., Tseng M. et al. Renewable energy system on frequency stability control strategy using virtual synchronous generator // Symmetry. 2020. Vol. 12. N10. pp. 1697-1699.

26. Chen J., Liu M., Milano F. Adaptive virtual synchronous generator considering converter and storage capacity limits // CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2022. Vol. 8. N2. pp. 580-590.

27. Николаев Ю.Е., Осипов В.Н., Игнатов В.Ю. Методика расчета энергетических показателей автономного энергокомплекса, включающего ГТУ, ВЭУ и аккумуляторы электрической энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 3. С. 36-43.

28. Cvetkovic I., Boroyevich D., Burgos R. et al. Modeling of a virtual synchronous machine-

based grid-interface converter for renewable energy systems integration // 2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL).2014.

29. Alsiraji H., El-Shatshat R. Comprehensive assessment of virtual synchronous machine based voltage source converter controllers // IET Generation, Transmission and Distribution 2017. Vol. 11 N.7, pp. 1762-1769.

30. Badreldien M. M., Johnson B. K. Virtual Synchronous Generator Controller for Solar Photovoltaic System. 2021 IEEE Electrical Power and Energy Conference. 2021. pp. 480-485.

31. Fang H., Yu Z. Improved virtual synchronous generator control for frequency regulation with a coordinated self-adaptive method // CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2020.

32. Серебрянников, А. В., Богомолова С.А. Принципы построения инверторов в солнечных электростанциях для сброса электрической энергии в сеть // Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечных элементов 3-го поколения : Сборник материалов I Всероссийской научной конференции, Чебоксары, 19–20 июля 2013 года. – Чебоксары: Типография "Полиграфика", 2013. – С. 100-107.

Авторы публикации

Саттаров Роберт Радиевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электротехники и электрооборудования предприятий» Уфимского государственного нефтяного технического университета. г. Уфа. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9624-965X>. E-mail: sattar.rb@gmail.com.

Гарафутдинов Рустам Разифович – аспирант кафедры «Автоматизации технологических процессов» Уфимского университета науки и технологий. г. Уфа. E-mail: garafutdinov_r_r@mail.ru.

References

1. Sattarov R.R., Garafutdinov R.R. Tekhnologiya virtual'nogo sinhronnogo generatora dlya povysheniya ustojchivosti energosistem. *Aktual'nye problemy elektroenergetiki*. 2021. – 435 s (In Russ).
2. Sheryazov S.K., Issenov S.S., Iskakov R.M., et al. The main types of wind turbines-generators in the power supply system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(5):24-33. (In Russ.) doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-24-33.
3. Cheema K.M. A comprehensive review of virtual synchronous generator // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 120, 2020. doi:10.1016/j.ijepes.2020.106006.
4. Chen M., Zhou D., Blaabjerg F. Modelling, implementation, and assessment of virtual synchronous generator in power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*.2020;8(3):399-411. doi:10.35833/MPCE.2019.000592.
5. Sakimoto K., Miura Y., Ise T. Stabilization of a power system with a distributed generator by a Virtual Synchronous Generator function. *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, 2011; 1498-1505, doi: 10.1109/ICPE.2011.5944492.
6. Zacarinnaya Yu.N., Reutin G.V., Kurilov S.S., et al. Prediction of electricity generation from res by machine learning methods. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(3):81-92. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-81-92.
7. Burmeister M. V., Bulatov R. V., Blinova K. A. Primenenie sistem virtual'noi inertsii dlya uluchsheniya kachestva perekhodnykh protsessov v elektroenergeticheskikh sistemakh. *Fedorovskie chteniya — 2021 : LI mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s elementami nauchnoi shkoly*, Moskva, 17–19 Nov 2021. – Moscow: MEI Publ., 2021. – pp. 318-324. (In Russ.).
8. Askarov A.B., Suvorov A.A., Andreev A.S, Gusev M.V. To the Question of Modern Principles of Renewable Energy Sources Control Based on a Virtual Synchronous Generator. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Sys`s*. 2022;41:5-30. (In Russ.). doi:10.15593/2224-9397/2022.1.01.
9. Mallemaci V., Mandrile F., Rubino S. et al. A comprehensive comparison of Virtual Synchronous Generators with focus on virtual inertia and frequency regulation. *Electric Power Systems Research*. 2021;201:107516. doi:10.1016/j.epsr.2021.107516.
10. Sang W., Guo W., Dai S., et al. Virtual synchronous generator, a comprehensive overview. *Energies*. 2022;15(17). pp. 6148.
11. Kong, X., Pan, J., Gong, X., et al. Emulating the features of conventional generator with virtual synchronous generator technology: an overview. *The Journal of Engineering*, 2017;(13):2135–2139. doi:10.1049/joe.2017.0707.
12. Sardalov R.B., Elmurzaev A.A., Debiev M.V., et al. Prospects for the development of traditional and unconventional energy in the Chechen Republic. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(4):134-144. (In Russ.) doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-134-144.

13. Hirase Y., Ohara Y., Bevrani H. Virtual synchronous generator-based frequency control in interconnected microgrids. *Energy Reports*. 2020;(6):97-103. doi:10.1016/j.egy.2020.10.044.
14. Lin C., Xiao L., Sattarov R. Power System Control of More-electric Aircraft Engine Based on Double Closed Loop Feedback. *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, 2019; pp. 1-6, doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8950008.
15. Robert F., Roger C. Review of the Impacts of Distributed Generation on Distribution Protection. *2015 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC)*. 2015. pp. 69-74. doi:10.1109/REPC.2015.12.
16. Lukutin B.V., Karrar Hameed K. Optimization of energy balances of a photovoltaic power plant with electrochemical and thermal storage of solar energy. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(2):3-13. (In Russ.) doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-3-13.
17. Sattarov R.R., Garafutdinov R.R. Modeling Advanced Automatic Overcurrent Limiting System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020; 20(1): 30–37. (in Russ.) doi:10.14529/power200104.
18. Sattarov R., Fedosov E., Garafutdinov R. et al., Application of PSCAD in Practical Studies of Electrical Power Engineering Student // *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, 2019; 1-6, doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8950001.
19. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. The study of the isolated power supply system operation with controlled distributed generation plants, energy storage units and drive load. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(5):184-194. (In Russ.) doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-184-194.
20. Burmeister M.V., Bulatov R.V., Kochergin A.V., et al. Primenenie virtual'noj sinhronnoj mashiny dlya integracii vozobnovlyaemyh istochnikov energii v ob"edinyonnye energosistemy. *Nauchnoe soobshchestvo studentov: mezhdisciplinarnye issledovaniya: sb. st. po mat. LXXIV mezhdunar. stud. nauch.-prakt. Konf.* № 15(74) (In Russ).
21. Kolpakov A.I. Kondensatory Electronicon dlya vysokovol'tnyh preobrazovatel'nyh ustroystv. *Komponenty i tekhnologii*, 2004; 6: 22-25 (In Russ).
22. Abuagreb M., Allehyani M. F., Johnson B. K. Overview of Virtual Synchronous Generators: Existing Projects, Challenges, and Future Trends. *Electronics*. 2022;11(18):2843. doi: 10.3390/electronics11182843.
23. Zhong Q-C, Weiss G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators // *IEEE Trans Industry Electron*. 2010. 58(4):1259 - 1267. doi: 10.1109/TIE.2010.2048839.
24. Lou G., Yang Q., Gu W., et al. An improved control strategy of virtual synchronous generator under symmetrical grid voltage sag. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. 121(8):106093. doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106093.
25. Li L., Li H., Tseng M. et al. Renewable energy system on frequency stability control strategy using virtual synchronous generator. *Symmetry*. 2020;12(10):1697. doi:10.3390/sym12101697.
26. Chen J., Liu M., Milano F. Adaptive virtual synchronous generator considering converter and storage capacity limits. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2022.8(2). pp. 580-590.
27. Nikolaev Y.E., Osipov V.N., Ignatov V.Y. Calculation methodology of the energy indicators of an self-contained energy complex including gas turbine plants, wind-driven power plant and electric storage cell. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(3):36-43. (In Russ.) doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-36-43.
28. Cvetkovic I., Boroyevich D., Burgos R. et al. Modeling of a virtual synchronous machine-based grid-interface converter for renewable energy systems integration. *2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*. 2014. doi:10.1109/compel.2014.6877195.
29. Alsiraji H., El-Shatshat R. Comprehensive assessment of virtual synchronous machine-based voltage source converter controllers. *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2017;11(7):1762-1769. doi:10.1049/iet-gtd.2016.1423.
30. Badreldien M. M., Johnson B. K. Virtual Synchronous Generator Controller for Solar Photovoltaic System. *2021 IEEE Electrical Power and Energy Conference*. 2021. pp. 480-485.
31. Fang H., Yu Z. Improved virtual synchronous generator control for frequency regulation with a coordinated self-adaptive method. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2020.
32. Serebryannikov, A. V., Bogomolova S. A. Principy postroeniya invertorov v solnechnykh elektrostanciyah dlya sbrosa elektricheskoy energii v set'. *Nanostrukturirovannye materialy i preobrazovatel'nye ustrojstva dlya solnechnykh elementov 3-go pokoleniya: Sbornik materialov I Vserossijskoj nauchnoj konferencii, Cheboksary*, 2013. pp. 100-107. (In Russ.).

Author of the publication

Robert R. Sattarov - Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9624-965X>. E-mail: sattar.rb@gmail.com.

© Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р.

Rustam R. Garafutdinov - Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
E-mail: garafutdinov_r_r@mail.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **15.02.2024 г.**

Отредактировано **06.03.2024 г.**

Принято **13.03.2024 г.**



ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Шпиганович А.Н.¹, Шпиганович А.А.¹, Петров А.Р.^{2*}, Грачева Е.И.²

¹Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

petroval13@mail.ru*

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Тепловизионное обследование используется для контроля технического состояния электрооборудования, а также контактов и контактных соединений коммутационных аппаратов, что позволяет повысить эффективность работы. *ЦЕЛЬ.* Своевременное выявление дефектов контактов и контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов для предотвращения возникновения аварийных ситуаций. *МЕТОДЫ.* Определение и контроль технического состояния электрооборудования, контактов и контактных соединений аппаратов в реальном времени с помощью индикаторов и тепловизионного контроля. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Произведен анализ значений температур нагрева контактов от материала и вида контактных соединений. Определены критерии оценки состояния контактов коммутационных аппаратов с помощью индикаторов их состояния. Получены оптимальные значения коэффициентов загрузки автоматического выключателя в литом корпусе ВА04 и контакторов КМИ и КТИ. Показаны аварийные случаи на промышленном объекте, которые доказывают необходимость применения индикаторов и тепловизионного обследования как одного из инструментов автоматизации контроля технического состояния низковольтного электрооборудования. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Предлагаемый бесконтактный метод оценки и контроля технического состояния электрооборудования, контактов и контактных соединений аппаратов в реальном времени с помощью индикаторов и тепловизионного контроля позволяет как получать данные в режиме реального времени, так и увеличивать межремонтные периоды для энергетического оборудования и повышать надежность работы всей системы в целом.

Ключевые слова: электрическая сеть; тепловизионный контроль; индикаторы; дефекты оборудования; коммутационные аппараты; контактные соединения.

Для цитирования: Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Петров А.Р., Грачева Е.И. Тепловизионный контроль электрооборудования промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77.

THERMAL IMAGING CONTROL OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

Shpiganovich¹ A.N., Shpiganovich¹ A.A., Petrov^{2*} A.R., Gracheva² E.I.

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

petroval13@mail.ru*

Abstract: *RELEVANCE.* Thermal imaging control is used to monitor the technical condition of electrical equipment, as well as contacts and contact connections of switching devices, which allows to increase the efficiency of work. *OBJECT.* Timely detection of defects of contacts and contact connections of low-voltage switching devices to prevent emergencies. *METHODS.* Determination and control of technical condition of electrical equipment, contacts and contact connections of apparatuses in real time by means of indicators and thermal imaging control.

RESULTS. The values of contact heating temperatures from material and type of contact connections were analysed. The criteria for estimation of the state of contacts of switching devices with the help of indicators of their state have been determined. The optimum values of loading coefficients of the circuit breaker in moulded case VA04 and contactors KMI and KTI are obtained. Emergency cases at the industrial object are shown, which prove the necessity of application of indicators and thermal imaging control as one of the tools of automation of technical condition control of low-voltage electrical equipment. **CONCLUSIONS.** The offered non-contact method of estimation and control of technical condition of electrical equipment, contacts and contact connections of devices in real time with the help of indicators and thermal imaging control allows both to receive data in real time mode and to increase inter-repair periods for power equipment and to increase reliability of operation of the whole system.

Keywords: electrical network; thermal imaging control; indicators; equipment defects; switching devices; contact connections.

For citation: Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Petrov A.R., Gracheva E.I. Thermal imaging control of electrical equipment of industrial enterprises. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (2): 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77.

Введение (Introduction)

Одним из эффективных методов контроля технического состояния электрооборудования и коммутационных аппаратов является тепловизионное обследование. К достоинствам данного вида контроля относятся требуемая степень точности, время проведения диагностики, предоставление наиболее полной информации о контролируемом узле или объекте, а также непрерывность самого наблюдения. Далее приведены некоторые научные работы, посвященные исследованиям в данной области.

Зарипова А. Д., Зарипов Д. К., Усачев А. Е. в [1] показали методику тепловизионного контроля для выявления дефектов электрооборудования. Для диагностируемых узлов оборудования определены степени их неисправности в зависимости от установленных значений превышения избыточных температур.

Львов М.Ю., Никитина С.Д., Лесив А.В. в [2] сравнили принципы оценки теплового состояния контактных соединений оборудования и предложили методологию применения термоиндикаторов для контроля их состояния.

Авторами Мамонтовым А.Н., Пушницей К.А. в [3] сформирован перечень обследуемых узлов, а также определены особенности проведения тепловизионной диагностики реакторов напряжением до и выше 1000 В, а Мамонтов А.Н., Рычков А.В., Астанин С.С. в [4] представили результаты тепловизионного контроля трансформаторов тока и трансформаторов напряжения и исследовали их различные дефекты.

Федотов А. И., Грачева Е. И., Наумов О. В. в [5] предложили критерий оценки технического состояния контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов по результатам тепловизионного контроля, позволяющий учесть динамику изменения потерь в низковольтных сетях, а Шпигановичем А. Н., Мамонтовым А. Н., Бойчевским А. В. в [6] разработана методика тепловизионного контроля конденсаторов и высокочастотных заградителей с рассматриваемыми сроками устранения дефектов.

Шпигановичем А. Н. и Мамонтовым А. Н. в [7] исследованы особенности проведения тепловизионного контроля разъединителей и установлено количество контролируемых точек электрооборудования, приведено описание режима работы при возникновении дефекта и термограммы дефектов разъединителей.

Andrei P., Cazacu E., Stanculescu M., Andrei H., Caciula I., Drosu O. в [8] исследовали в лабораторных условиях техническое состояние контактов и контактных соединений низкого напряжения с учетом нагрева. Результаты измерений использованы для разработки математических моделей зависимости температуры контактов и контактных соединений от времени и типа нагрузки. Эти модели используются для оптимального выбора типов контактных соединений между проводниками и коммутационными аппаратами.

Авторы Bhagat A. K., Chauhan A. в [9] предлагают тепловизионное обследование в качестве одного из методов диагностики неисправностей асинхронного электродвигателя напряжением до 1000В.

Dragomir A., Adam M., Antohi S.-M., Atanasoaei M., Pantiru A. В [10] представили методику мониторинга и диагностики тепловых нагрузок высоковольтного электрооборудования с помощью инфракрасной техники.

Hadzhiev I., Malamov D., Kolev N., Balabozov I., Yatchev I. B [11] показали результаты исследований распределения температуры по поверхности ножевых контактов и корпуса низковольтного предохранителя. Авторами исследовано влияние тока и контактного сопротивления на нагрев предохранителя и время его срабатывания.

Pareek S., Sharma R., Maheshwari R. в [12] анализируют возможность применения нейронной сети для проверки электрических узлов и классификации их теплового состояния. Предложенное решение позволяет расширить функциональные возможности диагностики за счет сокращения времени работы, уменьшения трудозатрат и повышения надежности системы.

Petrov A. R., Gracheva E. I., Sinyukova T., Valtchev S., Miceli R., Rahman A. U. в [13] исследовали параметры, определяющие величину потерь мощности в низковольтной коммутационной аппаратуре. Результаты работы, дополненные данными тепловизионных обследований, могут быть использованы для уточнения значения потерь электроэнергии в цеховой сети.

Wei C. в [14] предлагает метод диагностики тепловых повреждений электросетевых объектов, в частности, силовых трансформаторов. Система позволяет оценить их техническое состояние по данным инфракрасной тепловизионной съемки.

Исследователи Zhu-Mao L., Qing L., Tao J., Yong-Xin L., Yu H., Yang B. в [15] разработали систему обнаружения тепловых неисправностей высоковольтного электрооборудования на основе анализа инфракрасных изображений.

Как показывает отечественный и зарубежный опыт, в настоящее время требуются новые усовершенствованные подходы к оценке технического состояния элементов электрооборудования и коммутационных аппаратов внутрицехового электроснабжения.

Научной и практической значимостью статьи является своевременное выявление дефектов электрооборудования и контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов (НКА) для предотвращения возникновения аварийных ситуаций.

В настоящее время в электроэнергетике наблюдается переход от системы планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию оборудования при использовании универсальных средств технической диагностики, к которым относятся современные тепловизионные приборы. Полученные термографические изображения позволяют выявить различные дефектные состояния контактов НКА. При этом возможно увеличивать технический ресурс электрооборудования за счёт своевременного выявления дефектов на ранней стадии развития. На рисунке 1 представлены основные виды неисправностей в системе контактных соединений НКА, которые выявляются при помощи тепловизионного обследования.



Рис. 1. Виды неисправностей в контактных системах аппаратов и кабелей

Fig. 1. Types of faults in the contact systems of apparatus and cables

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Материалы и методы (Materials and methods)

При эксплуатации оборудования и НКА могут возникать неисправности, такие, как нарушение работы контактной системы, отключение из-за перегрузок в цепи и др. Данные отказы могут служить причиной размыкания цепи питания катушек контакторов, реле, электромагнитов, в результате чего аппараты повторно не могут включиться в работу. Одним из эффективных средств выявления неисправностей в контактных соединениях НКА является тепловизионный контроль.

Значения температуры нагрева контактов зависит от материала и вида контактных соединений. На основании ГОСТ 403-73 произведем разграничение температуры нагрева контактов НКА на индикаторы. Критерий оценки теплового состояния контактов НКА с помощью индикаторов является дополнением к данному стандарту, обеспечивающего формирования четкого алгоритма для автоматизации систем тепловизионного контроля.

Индикатор «контроль» соответствует допустимой температуре нагрева контактных соединений, которую следует держать под контролем. Индикатор «опасно» обязывает принять необходимые меры по устранению неисправности при ближайшем выводе оборудования в ремонт. Индикатор «дефект» – аварийное состояние, которое требует незамедлительного устранения. В таблице 1 приведены «индикаторы» в зависимости от температуры нагрева контактов НКА. Данные, представленные в таблице, актуальны для продолжительного режима работы аппаратов при температуре окружающей среды 40 °С.

Стоит также отметить, что представленные значения в таблице могут корректироваться – по определенным причинам. Это связано как с техническим прогрессом в тепловизионном обследовании оборудования, так и с ужесточением требований к допустимым температурам различных элементов аппаратов.

Для реализации системы контроля технического состояния НКА с помощью тепловизоров и индикаторов состояния необходимо реализовать автоматизированные программы, которые по заданным критериям в реальном времени будут контролировать состояние аппаратов и при отклонениях от параметров сигнализировать техническому персоналу на объекте о недопустимом состоянии.

Таблица 1

Table 1

Критерии оценки состояния контактов аппаратов по температуре нагрева
Criteria for assessing the condition of apparatus contacts by heating temperature

Контролируемый узел	Индикатор		
	«контроль»	«опасно»	«дефект»
Контакты главной цепи: – из меди без покрытия – покрытые серебром / с накладками из серебра – скользящие с накладками из серебра	до 45° до 200° до 80°	45°-85° 200°-240° 80°-120°	более 85° более 240° более 120°
Контакты вспомогательной цепи с накладками из серебра	до 80°	80°-120°	более 120°
Контакты внутри НКА (кроме паяных и сварных): – из меди, алюминия без покрытия от коррозии – из меди, алюминия с покрытием от коррозии – из меди с покрытием из серебра	до 55° до 65° до 95°	55°-95° 65°-105° 95°-135°	более 95° более 105° более 135°
Контакты внутри НКА (паяные мягким припоем – пайка обеспечивает механическую прочность)	до 60°	60°-100°	более 100°
Контакты внутри НКА (паяные мягким припоем – пайка частично обеспечивает механическую прочность)	индивидуально для каждого НКА		
Контакты внутри НКА (паяные твердым припоем / сварные)	не нормируется		
Контакты выводов НКА, предназначенные для соединения с внешними проводниками: – из меди, алюминия без защитных покрытий – с покрытием неблагородными металлами – из меди с покрытием из серебра	до 55° до 70° до 95°	55°-95° 70°-110° 95°-135°	более 95° более 110° более 135°

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Рассмотренный метод определения дефектного состояния контактов и контактных соединений НКА с помощью индикаторов позволит сократить время обнаружения и устранения неисправности для предотвращения аварийных ситуаций. Также наиболее рационально планировать действия при планово-предупредительных ремонтах и эффективно эксплуатировать как коммутационные аппараты, так и сеть электроснабжения в целом.

Обсуждение результатов (Discussing the results)

Одним из основных показателей, влияющих на продолжительность функционирования НКА, является режим работы с учетом коэффициента загрузки Кз. Определим наиболее оптимальное значение данного параметра с помощью рассмотренных

выше индикаторов. Для исследования выбраны одни из наиболее распространенных и используемых в системах электроснабжения промышленных предприятий г. Казани аппаратов: автоматический выключатель в литом корпусе ВА04 Курского электроаппаратного завода (КЭАЗ) и контакторы КМИ и КТИ фирмы ИЕК.

Выражение для определения расчетным способом значение температуры нагрева контакта имеет вид

$$T = \frac{I^2 \cdot \rho + \nu_0 \cdot F \cdot k_T \cdot S}{F \cdot k_T \cdot S - I^2 \cdot \rho \cdot \alpha}, ^\circ\text{C}$$

где I – ток, проходящий через контакты, А;

ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;

ν_0 – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$;

F – охлаждающая поверхность проводника, м^2 ;

k_T – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

S – площадь поперечного сечения контактов, м^2 ;

α – температурный коэффициент сопротивления.

Для выключателя ВА04 на номинальный ток 16 А расчетное значение температуры составит

$$T = \frac{16^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} + 35 \cdot 2(2,8 + 2,8) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 2,8 \cdot 2,8 \cdot 10^{-6}}{2(2,8 + 2,8) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 2,8 \cdot 2,8 \cdot 10^{-6} - 16^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0043} = 38,6 ^\circ\text{C}$$

Результаты расчетов температуры контактов и контактных соединений для автоматических выключателей и контакторов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Результаты расчетов температуры контактов аппаратов

Results of calculations of apparatus contact temperature

Аппарат	Ток, А	Кз	Температура контактов, $^\circ\text{C}$
Автоматический выключатель ВА04	16	1,0	38,6
	32		40,8
	40		44,3
	50		49,8
Контактор КМИ	25		40,7
	40		41,6
Контактор КТИ	250		41,5
	400		43

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 2 представлены графические зависимости температуры контактных площадок T от коэффициента загрузки K_z для автоматического выключателя марки ВА04 с номинальным током 16 А, 32 А, 40 А и 50 А.

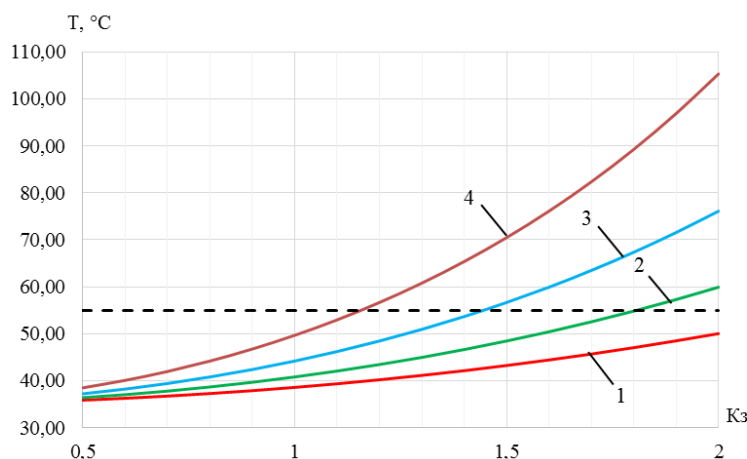


Рис. 2. Зависимости температуры нагрева контактов автоматического выключателя ВА04 от K_z : 1 – $I_{ном} = 16$ А; 2 – $I_{ном} = 32$ А;

Fig. 2. Dependence of heating temperature of contacts of circuit breaker VA04 on K_z : 1 – $I_{nom} = 16$ А; 2 – $I_{nom} = 32$ А;

$3 - I_{\text{ном}} = 40 \text{ А}; 4 - I_{\text{ном}} = 50 \text{ А}$

$3 - I_{\text{ном}} = 40 \text{ А}; 4 - I_{\text{ном}} = 50 \text{ А}$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На основании таблицы 1 индикатор «опасно» для исследуемого аппарата находится при значении 55°C . Значение коэффициента загрузки для автоматического выключателя на $I_{\text{ном}} = 50 \text{ А}$, при котором не происходит процесс разрушения контактов составляет $K_z = 1,15$, а максимальное значение перегрузки, при котором контактные соединения переходят в состоянии дефекта, составляет $K_z = 1,15-1,9$. Для $I_{\text{ном}} = 40 \text{ А}$ загрузка аппарата допускается до $K_z = 1,45$, при загрузке выше может произойти дефект. Аппарат на $I_{\text{ном}} = 32 \text{ А}$ выдерживает загрузку до $K_z = 1,8$ без дефектного состояния, у ВА04 на $I_{\text{ном}} = 16 \text{ А}$ двукратная загрузка не повлияла на состояние контактов.

Исследуем контакторы фирмы ИЕК на номинальные токи 25 А , 40 А , 250 и 400 А . Результаты для контакторов КМИ приведены на рисунке 3, для контакторов КТИ на рисунке 4.

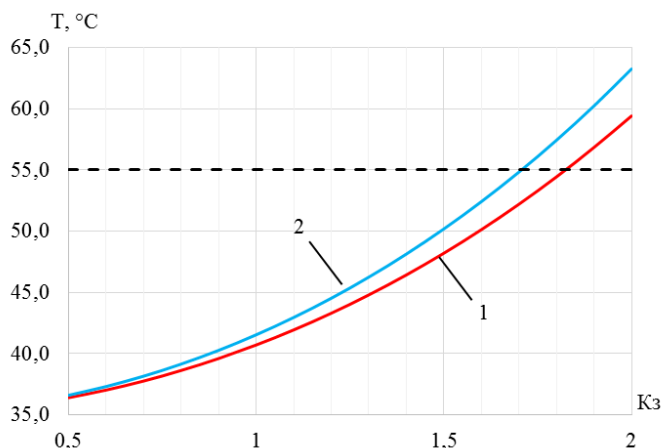


Рис. 3. Зависимости температуры нагрева контактов контактора КМИ от K_z :

1 – $I_{\text{ном}} = 25 \text{ А}$; 2 – $I_{\text{ном}} = 40 \text{ А}$

Fig. 3. Dependences of contactor KMI heating temperature on K_z :

1 – $I_{\text{ном}} = 25 \text{ А}$; 2 – $I_{\text{ном}} = 40 \text{ А}$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

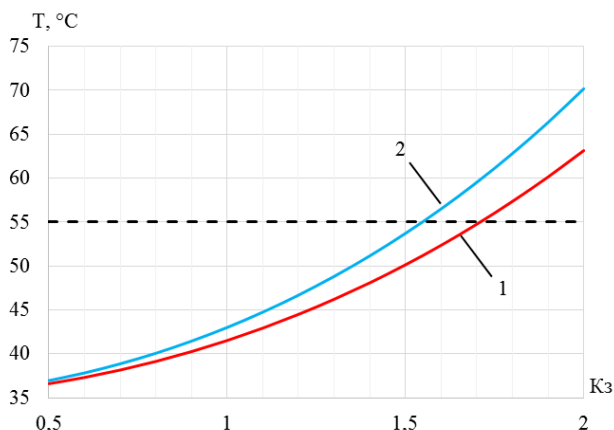


Рис. 4. Зависимости температуры нагрева контактов контактора КТИ от K_z :

1 – $I_{\text{ном}} = 250 \text{ А}$; 2 – $I_{\text{ном}} = 400 \text{ А}$

Fig. 4. Dependences of contactor KTI heating temperature on K_z :

1 – $I_{\text{ном}} = 250 \text{ А}$; 2 – $I_{\text{ном}} = 400 \text{ А}$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Индикатор «опасно» также находится при значении 55°C . Для контакторов КМИ на токи 25 А оптимальная загрузка составляет до $K_z = 1,8$, для аппарата на номинальный ток 40 А допустимая перегрузка $K_z = 1,7$.

Оптимальная загрузка контактора КТИ с $I_{\text{ном}} = 400 \text{ А}$ составляет $K_z = 1,55$, при загрузке выше возможен переход в состояние дефекта. Аппарат с $I_{\text{ном}} = 250 \text{ А}$ выдерживает загрузку $K_z = 1,7$ без проявления дефекта.

Далее рассмотрим практическое применение предложенного метода с помощью индикаторов. Покажем применение термографической техники в аварийной ситуации, в результате которой произошло возгорание с последующим задымлением питающего кабеля

электродвигателя насосной станции цеха водоснабжения. Причиной повреждения стало отключение контактора системы управления насосом. Выход из строя контактора происходит в результате одно- либо двухфазных замыканий на землю.

На практике доказано, что по достижении температуры, свыше 95 °С, контактным соединением происходит отказ. Покажем термограмму ввода автоматического выключателя (рис. 5) и термограмму контактов трансформатора тока (рис. 6).

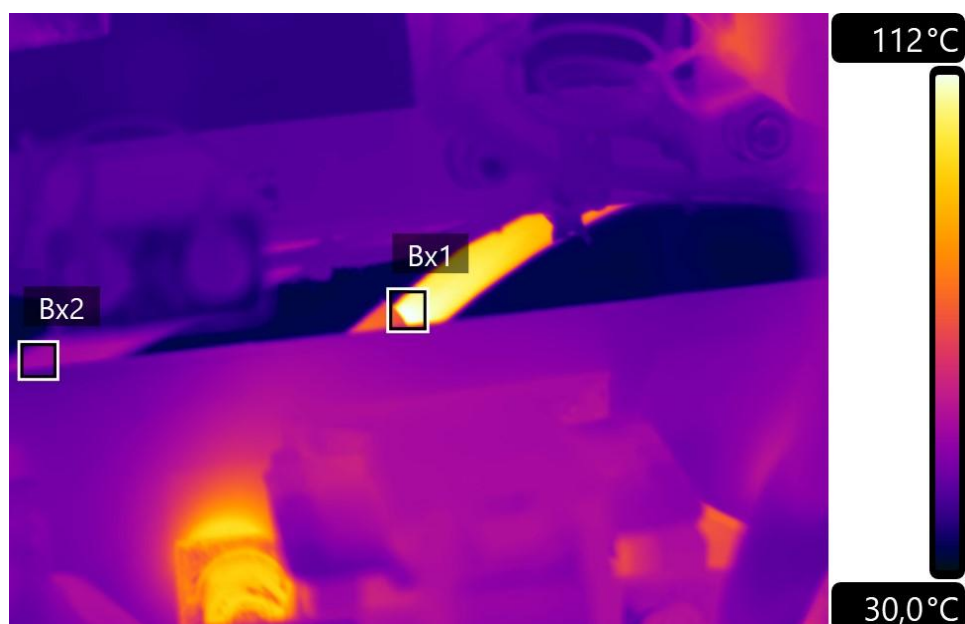


Рис. 5. Термограмма ввода автоматического выключателя Fig. 5. Thermogram of circuit breaker entry

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Рисунок 5 показывает, что максимальная температура контролируемого узла составляет 112 °С, это значительно выше значения индикатора «дефект», соответствующего 95 °С.

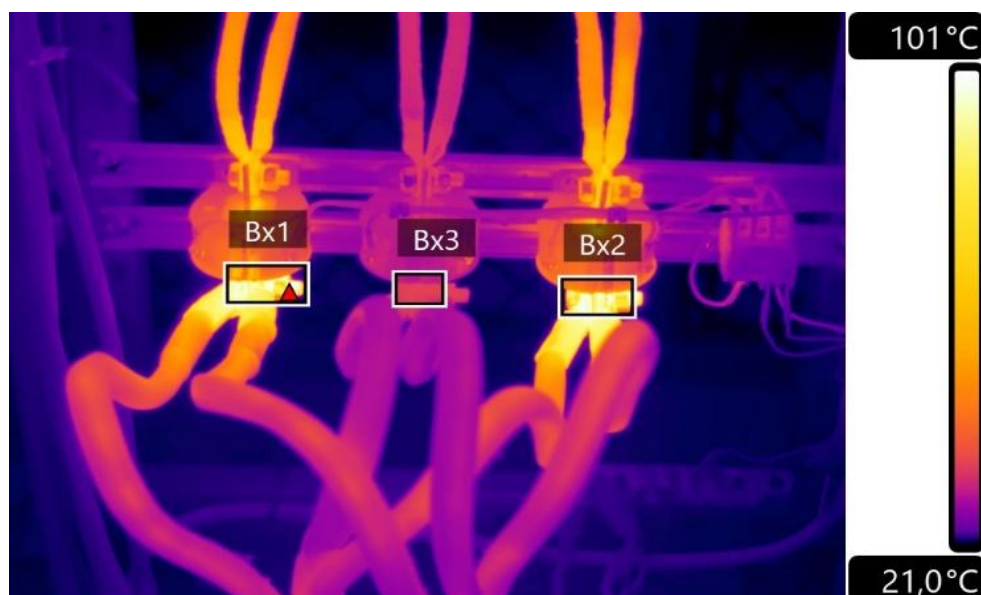


Рис. 6. Термограмма контактов трансформатора тока Fig. 6. Thermogram of current transformer contacts

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Термограмма контактов, представленная на рисунке 6, показывает, что максимальная температура контролируемого узла составила 101 °С, что также выше значения индикатора «дефект», соответствующего 95 °С.

Рассмотренные аварийные случаи на промышленном объекте доказывают необходимость применения индикаторов и тепловизионного контроля как одного из инструментов автоматизации для предотвращения аварийных ситуаций в будущем.

Заключение (Conclusions)

Исследование технического состояния контактов НКА показало, что из-за образования на поверхности проводников плёнок в ряде случаев происходит недопустимое повышение температуры контактного соединения. В результате этого возрастает сопротивление аппаратов по отношению к начальному значению. Тепловизионный контроль НКА обладает достаточной эффективностью при определении неисправностей, влияющих на функционирование всей системы электроснабжения низковольтных потребителей. Исследование позволяет оценить величину потерь в контактных соединениях, а также уточнить величину потерь электроэнергии в сетях, что планируется авторами показать в дальнейших работах.

Метод определения дефекта с помощью индикаторов рассматривается как основа автоматизации системы контроля за техническим состоянием аппаратов в реальном времени. Предлагается использовать метод при периодическом тепловизионном обследовании техническим персоналом на объектах промышленного и гражданского назначения.

Предложенный метод позволит достаточно точно рассчитать экономический ущерб от потери питания приемников электрической энергии, так как от этого зависит техническое состояние и уровень надежности наиболее ответственных узлов. Предлагаемый метод в совокупности с другими мерами способствует поддержанию должного уровня электробезопасности на объектах промышленного использования.

Литература

1. Зарипова А.Д., Зарипов Д.К., Усачев А.Е. Критерии выявления дефектов оборудования для тепловизионной системы контроля электрической подстанции // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017;19(5-6):51-57. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-51-57>.
2. Львов М.Ю., Никитина С.Д., Лесив А.В. Применение термоиндикаторов для контроля состояния контактов и контактных соединений при эксплуатации электрооборудования // Электрические станции. 2023. № 2. С. 44-51. doi:<http://dx.doi.org/10.34831/EP.2023.1099.2.008>.
3. Мамонтов А. Н., Пушница К. А. Тепловизионный контроль реакторов // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2019. №8. С. 145-151. DOI: 10.34031/article_5d4d7a2f4f7a33.36054500.
4. Мамонтов А. Н., Рычков А. В., Астанин С. С. Тепловизионный контроль трансформаторов тока и трансформаторов напряжения // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2016. № 4 (46). С. 9-18.
5. Федотов А. И., Грачева Е. И., Наумов О. В. Оценка технического состояния контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов по данным тепловизионного контроля // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2005. №9-10. С. 47-55.
6. Шпиганович А. Н., Мамонтов А. Н., Бойчевский А. В. Тепловизионный контроль конденсаторов и высокочастотных заградителей // Вестник ТГТУ. 2020. Т.26. №4 С. 555-563. DOI: 10.17277/vestnik.2020.04.pp.555-563.
7. Шпиганович А. Н., Мамонтов А. Н. Тепловизионный контроль разъединителей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №3. С. 74-79. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-3-74-79.
8. Andrei P., Cazacu E., Stanculescu M., Andrei H., Caciula I., Drosu O. Thermal Behavior of Electrical Contact for Different AC Loads // 2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania, 2023, pp. 1-4, DOI: 10.1109/MPS58874.2023.10187457.
9. Bhagat A. K., Chauhan A. Thermal Image-Based Fault Analysis of Induction Motors using a Novel Machine Learning Model // 2022 11th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART), Moradabad, India, 2022, pp. 1429-1433, DOI: 10.1109/SMART55829.2022.10046714.
10. Dragomir A., Adam M., Antohi S.-M., Atanasoaei M., Pantiru A. Monitoring and Diagnosis of Electrical Equipment by Infrared Thermography // 2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2022, pp. 516-520, DOI: 10.1109/EPE56121.2022.9959756.
11. Hadzhiev I., Malamov D., Kolev N., Balabozov I., Yatchev I. Thermal Diagnostics of a High Power Fuse with Thermovision Camera // 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Maldives, Maldives, 2022, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988120.
12. Pareek S., Sharma R., Maheshwari R. Application of artificial neural networks to monitor thermal condition of electrical equipment // 2017 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques

in Electrical Systems (CATCON), Rupnagar, India, 2017, pp. 183-187, DOI: 10.1109/CATCON.2017.8280208.

13. Petrov A. R., Gracheva E. Ivanovna, Sinyukova T., Valtchev S., Miceli R., Rahman A. U. Simulation of the Functional Characteristics of Low-Voltage Switching Devices, Based on the Example of Automatic Circuit Breakers // 2023 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Terrasini, Italy, 2023, pp. 690-695, DOI: 10.1109/ICCEP57914.2023.10247405.

14. Wei C. Power Grid Facility Thermal Fault Diagnosis via Object Detection with Synthetic Infrared Imagery // 2021 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEEET), Macau, Macao, 2021, pp. 217-221, DOI: 10.1109/CEEET53198.2021.9672631.

15. Zhu-Mao L., Qing L., Tao J., Yong-Xin L., Yu H., Yang B. Research on Thermal Fault Detection Technology of Power Equipment based on Infrared Image Analysis // 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China, 2018, pp. 2567-2571, DOI: 10.1109/IAEAC.2018.8577908.

Авторы публикации

Шпиганович Александр Николаевич – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электрооборудование» Липецкого государственного технического университета. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-1124-7901>. san@stu.lipetsk.ru.

Шпиганович Алла Александровна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электрооборудование», профессор кафедры «Экономика» Липецкого государственного технического университета. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0009-5528-6652>. saa@stu.lipetsk.ru.

Петров Алмаз Радикович – аспирант Казанского государственного энергетического университета. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>. petroval13@mail.ru.

Грачева Елена Ивановна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. gracheva.i@bk.ru.

References

1. Zaripova A.D., Zaripov D.K., Usachev A.E. Criteria for equipment defects for thermal power substation control system. Power engineering: research, equipment, technology. 2017;19(5-6):51-57. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-51-57>.

2. L'vov M.YU., Nikitina S.D., Lesiv A.V. Methodological principles of monitoring the condition of contacts and contact connections during the operation of electrical equipment using thermal indicators. Electrical stations. 2023. n. 2, pp. 44-51. (In Russ.) doi:<http://dx.doi.org/10.34831/EP.2023.1099.2.008>.

3. Mamontov A.N., Puschnitsa K.A. Thermal control of reactors. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 8. pp. 145–151. DOI: 10.34031/article_5d4d7a2f4f7a33.36054500. (In Russ.)

4. Mamontov A. N., Rychkov A. V., Astanin S. S. Thermal imaging control of current and voltage transformers. News of higher educational institutions of the Chernozem region. 2016. No. 4 (46). pp. 9-18. (In Russ.)

5. Fedotov A. I., Gracheva E. I., Naumov O. V. Assessment of the technical condition of contact connections of low-voltage switching devices according to thermal imaging control data. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2005. № 9-10. pp. 47-55. (In Russ.)

6. Shpiganovich A. N., Mamontov A. N., Boychevsky A. V. Thermal Control of Capacitors and High Frequency Restrainers. Bulletin of Tambov State Technical University. 2020. vol. 26, no. 4, pp. 555-563. (In Russ.) DOI: 10.17277/vestnik.2020.04.pp.555-563.

7. Shpiganovich A. N., Mamontov A. N. Thermal control of disconnectors. News of Tula State University. Technical science. 2021. №3. pp. 74-79. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2021-3-74-79.

8. Andrei P., Cazacu E., Stanculescu M., Andrei H., Caciula I., Drosu O. Thermal Behavior of Electrical Contact for Different AC Loads // 2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania, 2023, pp. 1-4, DOI: 10.1109/MPS58874.2023.10187457.

9. Bhagat A. K., Chauhan A. Thermal Image-Based Fault Analysis of Induction Motors using a Novel Machine Learning Model // 2022 11th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART), Moradabad, India, 2022, pp. 1429-1433, DOI: 10.1109/SMART55829.2022.10046714.

10. Dragomir A., Adam M., Antohi S.-M., Atanasoaei M., Pantiru A. Monitoring and Diagnosis of Electrical Equipment by Infrared Thermography // 2022 International Conference and Exposition on

Electrical And Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2022, pp. 516-520, DOI: 10.1109/EPE56121.2022.9959756.

11. Hadzhiev I., Malamov D., Kolev N., Balabozov I., Yatchev I. Thermal Diagnostics of a High Power Fuse with Thermovision Camera // 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Maldives, Maldives, 2022, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988120.

12. Pareek S., Sharma R., Maheshwari R. Application of artificial neural networks to monitor thermal condition of electrical equipment // 2017 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), Rupnagar, India, 2017, pp. 183-187, DOI: 10.1109/CATCON.2017.8280208.

13. Petrov A. R., Gracheva E. Ivanovna, Sinyukova T., Valtchev S., Miceli R., Rahman A. U. Simulation of the Functional Characteristics of Low-Voltage Switching Devices, Based on the Example of Automatic Circuit Breakers // 2023 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Terrasini, Italy, 2023, pp. 690-695, DOI: 10.1109/ICCEP57914.2023.10247405.

14. Wei C. Power Grid Facility Thermal Fault Diagnosis via Object Detection with Synthetic Infrared Imagery // 2021 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEEET), Macau, Macao, 2021, pp. 217-221, DOI: 10.1109/CEEET53198.2021.9672631.

15. Zhu-Mao L., Qing L., Tao J., Yong-Xin L., Yu H., Yang B. Research on Thermal Fault Detection Technology of Power Equipment based on Infrared Image Analysis // 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China, 2018, pp. 2567-2571, DOI: 10.1109/IAEAC.2018.8577908.

Authors of the publication

Alexander N. Shpiganovich – Lipetsk State Technical University. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-1124-7901>. san@stu.lipetsk.ru.

Alla A. Shpiganovich – Lipetsk State Technical University. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0009-5528-6652>. saa@stu.lipetsk.ru.

Almaz R. Petrov – Kazan State Power Engineering University. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>. petroval13@mail.ru.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. grachieva.i@bk.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы.

Получено **19.03.2024 г.**

Отредактировано **04.04.2024 г.**

Принято **19.04.2024 г.**



АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Возмилов А.Г., Илимбетов Р.Ю., Панишев С.А., Лисов А.А.

Южно-уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия

Panishef.serega@mail.ru

Резюме: Актуальность: Проблема вредных условий труда в России привлекает внимание из-за увеличения удельного числа работников, подвергающихся негативному воздействию на их здоровье. Особый интерес представляет анализ воздушной среды как основного фактора влияния на здоровье человека. Для уменьшения вредного влияния воздушной среды необходима ее очистка от вредных составляющих. Перспективным аппаратом для очистки воздушной среды является электрофильтр. Цель: Исследование направлено на выбор и оптимизацию электрофильтров для очистки воздушной среды в производственных помещениях. Целью является определение наиболее эффективной конструкции электрофильтра для очистки воздушной среды производственных помещений. Методы: Анализ проводится на основе статистических данных, результатов исследований электрофильтров разных конструкций по очистке воздушной среды от пыли, вредных газов и микроорганизмов. Результаты используются для сравнительного анализа. Результаты: Исследование выявляет, что электрофильтры различных конструкций демонстрируют разную эффективность в очистке воздуха в зависимости от типа конструкции. Установлено, что электрофильтры с игольчатыми коронирующими электродами на отрицательной короне могут значительно снизить выделение озона. Мокрые электрофильтры обладают регенерацией, а наличие нескольких ступеней увеличивает эффективность очистки. Заключение: Исследование подтверждает, что выбор электрофильтра должен зависеть от специфики производства и объема помещения. Для взрывоопасных сред следует предпочесть электростатические фильтры, тогда как для больших помещений рекомендуется мокрый многоступенчатый электрофильтр. Электрофильтры-озонаторы могут быть эффективны для обеззараживания воздуха. Обобщение результатов позволяет сделать вывод о важности выбора подходящего типа электрофильтра для обеспечения оптимальных условий воздушной среды для безопасности работников.

Ключевые слова: электроочистка воздуха; электрофильтр; виды электрофильтров; конструкция электрофильтров; мокрый электрофильтр, озонатор.

Для цитирования: Возмилов А.Г., Илимбетов Р.Ю., Панишев С.А., Лисов А.А. Анализ электрофильтров для очистки воздушной среды производственных помещений // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 78-96. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-78-96.

ANALYSIS OF ELECTRIC FILTERS FOR CLEANING THE AIR ENVIRONMENT OF PRODUCTION PREMISES

Vozmilov A.G., Ilimbetov R.Yu., Panishev S.A., Lisov A.A.

South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia

Panishef.serega@mail.ru

Abstract: Relevance: The problem of hazardous working conditions in Russia attracts attention due to an increase in the proportion of workers exposed to negative impacts on their health. Of particular interest is the analysis of the air environment as the main factor influencing human

health. 32.2% of workers in hazardous working conditions are exposed to airborne factors, which leads to occupational diseases. To reduce the harmful effects of the air, it is necessary to clean it from harmful components. A promising device for air purification is an electric precipitator. Purpose: The study is aimed at selecting and optimizing electric precipitators for air purification in industrial premises. The goal is to determine the most effective design of an electric precipitator for cleaning the air environment of industrial premises. Methods: The analysis is carried out on the basis of statistical data, the results of studies of electric precipitators of various designs for cleaning the air from dust, harmful gases and microorganisms. The results are used for comparative analysis. Results: The study reveals that different designs of electrostatic precipitators demonstrate different effectiveness in air purification depending on the type of design. The design of corona electrodes affects ozone generation. It has been established that two-zone electrostatic precipitators with needle corona electrodes on the negative corona can significantly reduce ozone emissions. Wet electrostatic precipitators have regeneration, and the presence of several stages increases the cleaning efficiency. Electrostatic filters do not generate ozone and can be used in explosive low-volume areas. Conclusion: The study confirms that the choice of electrostatic precipitator should depend on the specifics of production and the volume of the room. For explosive environments, electrostatic precipitators should be preferred, while for large areas, a wet multi-stage electrostatic precipitator is recommended. Electrostatic precipitators-ozonizers can be effective for air disinfection. Summarizing the results allows us to conclude that it is important to choose the appropriate type of electrostatic precipitator to ensure optimal air conditions for the safety of workers.

Keywords: electric air purification; electrostatic precipitator; types of electrostatic precipitators; design of electric precipitators; wet electrostatic precipitator, ozonizer.

For citation: Vozmilov A.G., Ilimbetov R.Yu., Panishev S.A., Lisov A.A. Analysis of electric filters for cleaning the air environment of production premises. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (2): 78-96. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-78-96.

Введение (Introduction)

В России существует значительное число трудящихся, и по последним данным «Росстат», на 1 января 2022 года, их насчитывалось 83,2 млн человек [1]. Однако, далеко не все работники находятся в благоприятных условиях труда. Анализ данной проблемы в России, показывает, что удельное число работников, занятых во вредных и опасных условиях труда, на протяжении последних лет держится на высоком уровне. На рисунке 1 представлена динамика изменения численности работников, занятых во вредных и опасных условиях труда, за период с 2008 по 2021 годы. Так, в 2008 году их численность составляла 26.2 % от общего числа работающих, а в 2021 году – 36.4 %, т.е. за данный период увеличилось на 10,2% [1,2,3,4].

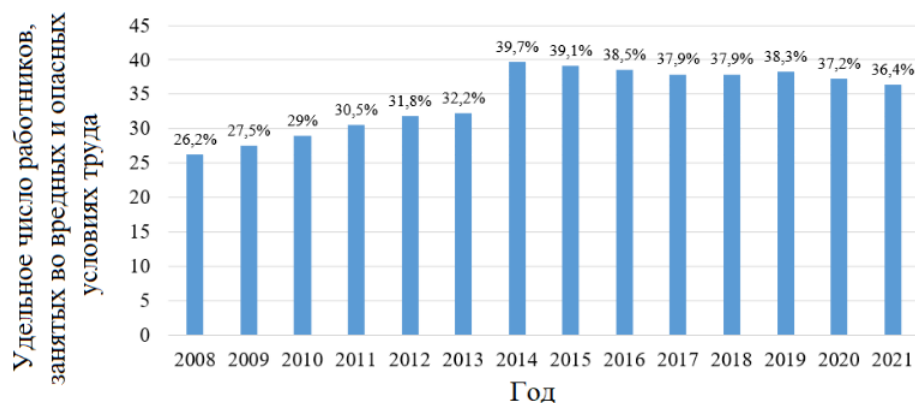


Рис. 1. Динамика изменения удельного число работников, занятых во вредных и опасных условиях, труда за период 2008–2021 гг., %

Fig. 1. Dynamics of change in the specific number of workers employed in harmful and hazardous working conditions, % for the period 2008-2021, %

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Работа во вредных условиях может негативно сказываться на здоровье и благополучии работников [4,5,6]. Они подвергаются воздействию вредных веществ, опасным физическим условиям или могут испытывать психологическое напряжение [7].

Из диаграммы (рис. 2) видно, что одним из основных факторов, негативно воздействующих на здоровье человека, является воздушная среда, с которыми связано 32,2% от общего количества профзаболеваний [8]. В связи с этим наибольшее число профзаболеваний относится к профзаболеваниям органов дыхания человека, различные виды пневмокониозов, бронхиальная астма, пылевые бронхиты и т.п. (рис. 2) По статистическим данным [9], из 100% заболевших пылевым бронхитом только 10% временно утрачивают работоспособность и 90% становится инвалидами.

Среди приоритетных веществ, формирующих загрязнение воздушной среды производственных помещений, первое место занимают взвешенные частицы РМ (РМ – от англ. particulate matter). В легких человека осаждаются частицы менее 5 мкм. Более того, по данным [8, 9], особенно опасны для здоровья человека РМ с аэродинамическим диаметром 5 – 0,5 мкм, которые достигают бронхиол и альвеол.

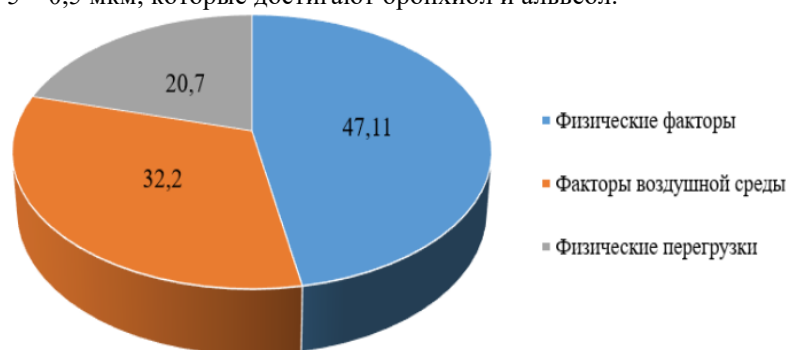


Рис. 2. Структура профессиональной патологии в зависимости от воздействующих факторов производственной среды и трудового процесса в Российской Федерации за 2022 год, %

Fig. 2. Structure of occupational pathology depending on influencing factors of industrial environment and labor process in the Russian Federation for 2022, %

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Одним из энергоэффективных методов снижения профзаболеваний, связанных с загрязнением воздушной среды, является система очистки воздуха, работающая в режиме внутренней рециркуляции. Данная система позволяет снижать концентрацию вредных веществ в воздушной среде производственных помещений до предельных допустимых концентраций (ПДК пыли цемента, оливины, апатита, глины – 8 мг/м³, ПДК пыли талька, вермикулита – 0,1 мг/м³) [10]. В [11] показано, что электрофильтр является перспективным аппаратом для очистки воздушной среды производственных помещений. Однако остается вопрос, какое именно устройство необходимо выбрать, поскольку на каждом производстве имеется своя специфика выбросов и требований к воздушной среде. Среди всех способов обеспыливания газов, электрический является наиболее эффективным, а электрофильтр – самым универсальным аппаратом, т.к. сила, обеспечивающая улавливание, приложена непосредственно к частице, несущей электрический заряд [12, 13].

Принцип работы электрофильтра.

Принцип работы электрофильтра с коронным разрядом (рис. 3) основан на использовании электрического поля для улавливания твердых частиц и других загрязнителей из воздушного потока. Загрязненный воздух, содержащий твердые частицы, дым, аэрозоли и другие загрязнители, поступает в электрофильтр через входное отверстие. Загрязненный воздух проходит через систему коронирующих электродов (1). Эти электроды обычно представляют собой металлические иголки, подключенные к источнику постоянного напряжения. Это вызывает ионизацию воздуха и зарядку твердых частиц, присутствующих в потоке. Заряженные частицы (3) подвергаются воздействию электростатических сил, которые заставляют их перемещаться в направлении осадительных электродов (2). Таким образом, частицы притягиваются к электродам и оседают на их поверхности. Чистый воздух, освобожденный от частиц, проходит через электрофильтр и направляется обратно в помещение [14,15,16].

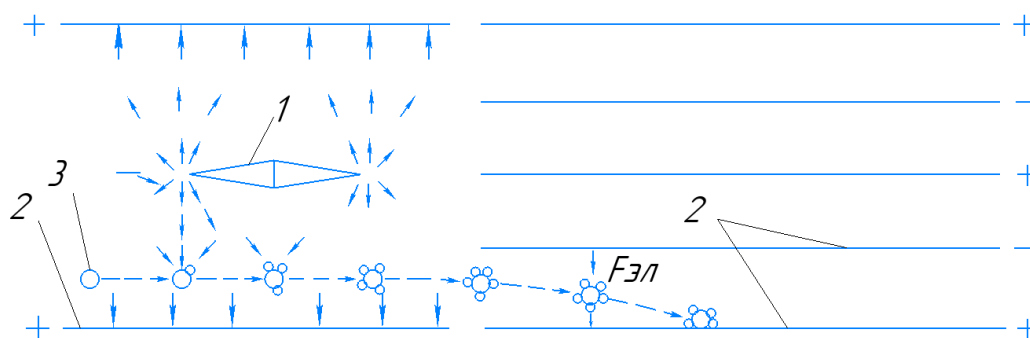


Рис. 3. Конструкция и принцип работы электрофильтра: 1 – Коронирующий электрод, 2 – Осадительные электроды, 3 – Пылевидные частицы

Fig. 3. Design and principle of ESP operation: 1 - Coronaizing electrode, 2 - Precipitation electrodes, 3 - Dust particles

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Выбор конструкции электрофильтра для очистки воздушной среды в производственных помещениях зависит от различных факторов, включая тип загрязнителей, объем воздушного потока, характеристики производственного процесса и требования по чистоте воздуха [17]. Стоит учитывать ряд ключевых аспектов при выборе конструкции электрофильтра: тип загрязнителей, объем воздушного потока, требования по очистке воздуха от микроорганизмов, энергоэффективность.

Если в производственном процессе преобладают твердые частицы (пыль, металлические стружки и т.д.), необходимо выбирать электрофильтры с высокой эффективностью фильтрации для частиц определенного размера. Для удаления газов необходимо наличие функции очистки от газов. Также важно определить необходимый объем воздушного потока в производственном помещении, чтобы выбрать электрофильтр с соответствующей производительностью. Некоторые производства могут требовать высокую степень очистки воздуха от микроорганизмов в соответствии с определенными нормами и стандартами. В этом случае необходимо выбирать электрофильтры с высокой генерацией озона. Стоит обратить внимание на энергоэффективность выбранной конструкции электрофильтра, чтобы минимизировать энергопотребление и операционные расходы [18].

Цель исследования заключается в определении наиболее эффективной конструкции электрофильтра для очистки воздушной среды производственных помещений с учетом специфики самого помещения и удаляемых веществ.

Научная значимость исследования состоит в нескольких аспектах, охватывающих области технологии, окружающей среды и здравоохранения. Исследования в области конструкций электрофильтров могут привести к разработке новых технологий и инноваций, направленных на повышение эффективности очистки воздуха, снижение энергопотребления, увеличение стойкости к различным загрязнителям и обеспечение более длительного срока службы устройств.

Практическая значимость исследования проявляется в улучшение условий труда работников, соблюдении стандартов и нормативов, снижении вредного воздействия на окружающую среду. Это имеет важное значение для поддержания высокого качества воздуха в производственных помещениях, что приводит к улучшению условий труда, снижая риск различных заболеваний, связанных с воздействием на организм вредных веществ. Использование эффективных электрофильтров снижает выбросы вредных веществ в атмосферу, что важно для соблюдения экологических норм и стандартов. Это способствует улучшению качества воздуха и снижению негативного воздействия производства на окружающую среду.

Материалы и методы

Классификация электрофильтров представлена на рисунке 4.



Рис. 4. Классификация электрофильтров

Fig. 4. Classification of electrostatic precipitators

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Рассмотри подробнее каждый из видов.

Пластиночатые электрофильтры - аппараты с осадительными электродами в виде пластин, расположенных на некотором расстоянии друг от друга [19]. Между пластинами размещены коронирующие электроды, укрепленные на рамах. На рисунке 5 схематично изображено расположение электродов пластиночатого электрофильтра [20].

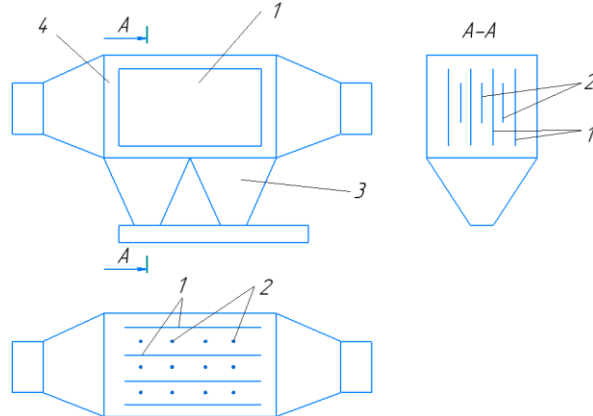


Рис. 5. Пластиночатый электрофильтр:

Fig. 5. Plate electrostatic precipitator:

1 – осадительные электроды, 2 – коронирующие электроды, 3 – бункер для сбора пыли, 4 – корпус

1 - precipitation electrodes, 2 - corona electrodes, 3 - dust collection hopper, 4 - housing

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Трубчатый электрофильтр (рис. 6) представляет собой форму электрофильтра, в которой главный элемент – это трубки или каналы, по которым проходит загрязненный воздух. Трубки обычно изготовлены из материалов, химически устойчивых и противостоящих коррозии. Внутри трубок размещены коронирующие электроды, которые представляют собой металлические игольчатые элементы, подключенные к источнику постоянного напряжения [21]. Когда загрязненный воздух проходит через трубки, электрическое поле между коронирующими электродами и трубками ионизирует воздух. Это приводит к зарядке твердых частиц и аэрозолей, присутствующих в воздухе [22]. Заряженные частицы подвергаются действию электростатических сил, которые

заставляют их двигаться в сторону осадительных электродов. Это приводит к удержанию частиц на поверхности трубок [23].

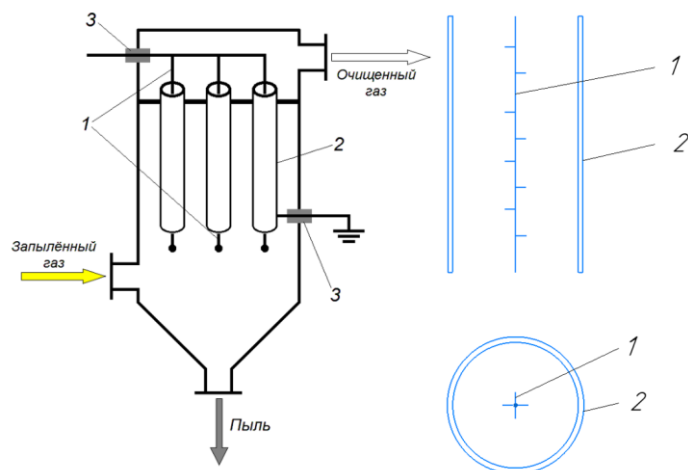


Рис. 6. Трубчатый электрофильтр:

1 – коронирующие электроды, 2 – осадительные электроды, 3 – изоляторы

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 6. Tube electrostatic precipitator: 1 - corona electrodes, 2 - precipitation electrodes, 3 - insulators

В рассмотренных выше фильтрах пыль с электродов удаляют путём их встряхивания, при этом пыль сыпается в бункер, либо смыванием струей жидкости (мокрые) [24]. Для этого электрофильтр отключают на время очистки [25]. Данные электрофильтры выполняются больших размеров и применяются для очистки больших объемов промышленных газов, выбрасываемых в атмосферу [26].

В работах [27,28] предлагается для очистки воздушной среды производственных помещений использовать двухзонный электрофильтр (Рис. 7). Конструкция данного электрофильтра защищена патентом на изобретение [29]. Электрофильтр такого типа имеет две отдельные зоны – зону зарядки и зону осаждения. Попадая в зону зарядки частица аэрозоля приобретает заряд, далее в зоне осаждения частица прилипает к осадительным электродам.

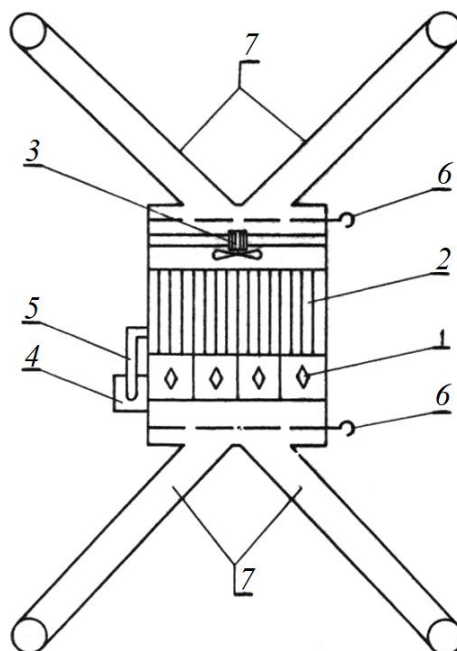


Рис. 7 – Конструкция системы очистки воздуха на базе двухзонного электрофильтра: 1 - зона зарядки, 2 - зона осаждения, 3 - вентилятор, 4 - источник высокого напряжения, 5 - высоковольтный вывод, 6 - задвижки воздуховода, 7 - воздуховоды

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 7 - Design of air purification system based on a two-zone electrostatic precipitator: 1 - charging zone, 2 - settling zone, 3 - fan, 4 - high-voltage source, 5 - high-voltage lead, 6 - duct gate valves, 7 - ducts

Результаты испытаний показали эффективность очистки воздуха от аэрозольных частиц – 95% при скорости воздушного потока через фильтр 2м/с.

В процессе работы электрофильтров, при использовании электрического разряда для ионизации воздуха, может наблюдаться выделение озона [30]. Высокие концентрации озона в воздухе (ПДК озона для человека 0,1 мг/м³) могут вызвать различные респираторные проблемы, такие как кашель, затрудненное дыхание, раздражение горла и усиление симптомов астмы. Озон может также наносить вред здоровью животных. Озон может вызывать разрушение и деградацию материалов, таких как резина, пластмассы и краски. Это может привести к снижению долговечности различных материалов и сооружений.

При выборе электрофильтра важно обратить внимание на выделение озона и стремиться к минимизации этого явления.

В [32] показано, что озоновыделение электрофильтром существенно зависит от типа коронирующего электрода и полярности коронного разряда. В работе были проведены экспериментальные исследования двухзонного электрофильтра на озоновыделение. Эксперимент проводился при двух типах электродов: проволочных, диаметров $0,3 \cdot 10^{-3}$ м, и игольчатых. При этом сначала на коронирующие электроды подавался положительный потенциал и снималась характеристика, а затем эксперимент повторялся с отрицательным потенциалом на коронирующих электродах. На рис. 8 представлена озоно-токовая характеристика двухзонного электрофильтра [33].

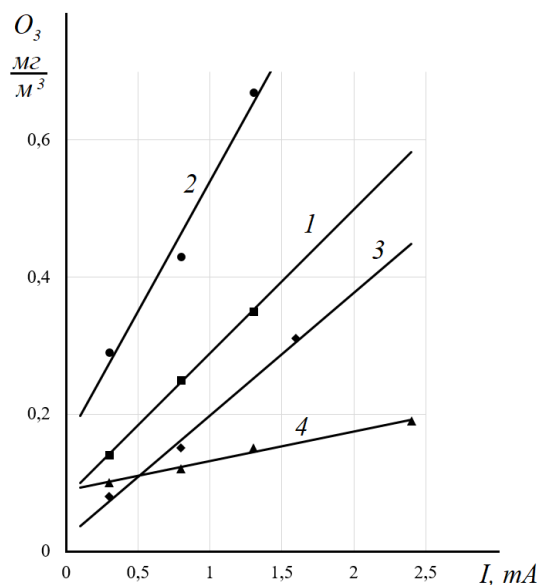


Рис. 8. Концентрация озона на выходе электрофильтра (скорость воздушного потока $u = 2$ м/с): 1 – Проволочные электроды положительная корона, 2 – Проволочные электроды отрицательная корона, 3 – Игольчатые электроды положительная корона, 4 – Игольчатые электроды отрицательная корона

Fig. 8. Ozone concentration at the electrostatic precipitator outlet (air flow velocity $u = 2$ m/s): 1 - Wire electrodes positive corona, 2 - Wire electrodes negative corona, 3 - Needle electrodes positive corona, 4 - Needle electrodes negative corona

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ результатов исследования двухзонного электрофильтра на предмет озоновыделения показал, что при работе с игольчатыми коронирующими электродами на отрицательной короне озона выделялось в 2 раза меньше, чем при работе на положительной короне с проволочными электродами. Использование игольчатых коронирующих электродов позволило перевести работу электрофильтра с общепринятой положительной короны (имеются в виду двухзонные электрофильтры) на отрицательную корону. Таким образом при использовании электрофильтра для очистки воздуха в помещениях, с точки зрения уменьшения озоновыделения необходимо включать его на отрицательной короне с игольчатыми коронирующими электродами.

Для уменьшения озоновыделения и повышения степени очистки электрофильтра разработан электрофильтр с металлической сеткой (рис. 9). В электрофильтр

устанавливались одна или две сетки на входе зоны зарядки и на выходе из зоны зарядки [34]. Результаты испытаний (рис. 10, 11) показали повышение эффективности очистки воздуха электрофильтром при использовании сеток. Также произошло снижение концентрации озона при использовании сеток [35].

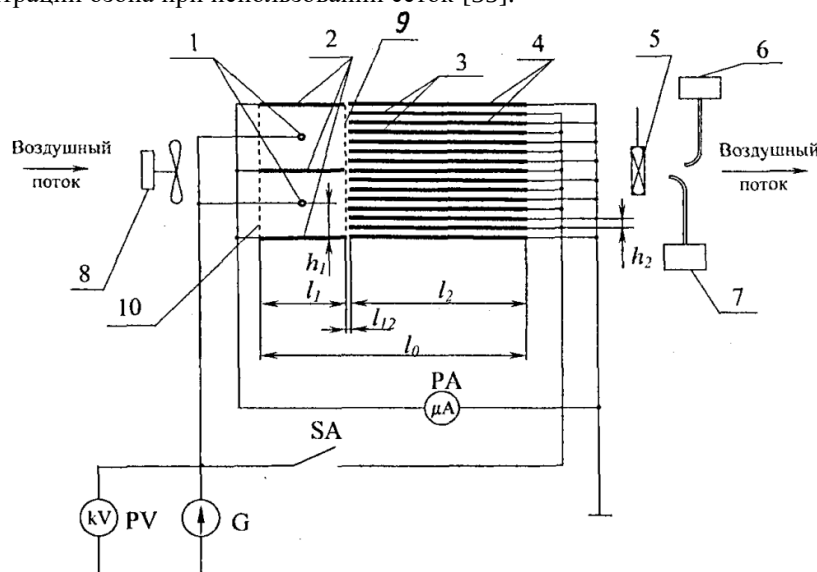


Рис. 9 – Схема экспериментального стенда: 1 - коронирующий электрод; 2 - некоронирующий электрод; 3 - высоковольтный электрод; 4 - заземленный электрод; 5 - цифровой анемометр АП1М; 6 - счетчик аэрозольных частиц ПК.ГТА-0,3-002; 7 - газоанализатор озона 3.02.П; 8 - вентилятор АВ50/2Т; 9 - заземленная металлическая сетка на выходе зоны зарядки; 10 - заземленная металлическая сетка на входе зоны зарядки; G - источник высокого напряжения АКИ-50; PV - киловольтметр С 196; РА - комбинированный прибор Ц 4311

Fig. 9 - Scheme of the experimental stand: 1 - corona electrode; 2 - non-corona electrode; 3 - high-voltage electrode; 4 - grounded electrode; 5 - digital anemometer AP1M; 6 - aerosol particle counter PK.GTA-0,3-002; 7 - ozone gas analyzer 3.02.P; 8 - fan AV50/2T; 9 - grounded metal grid at the outlet of the charging zone; 10 - grounded metal grid at the inlet of the charging zone; G - high voltage source AKI-50; RV - kilovoltmeter C 196; RA - combined device Ts 4311

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

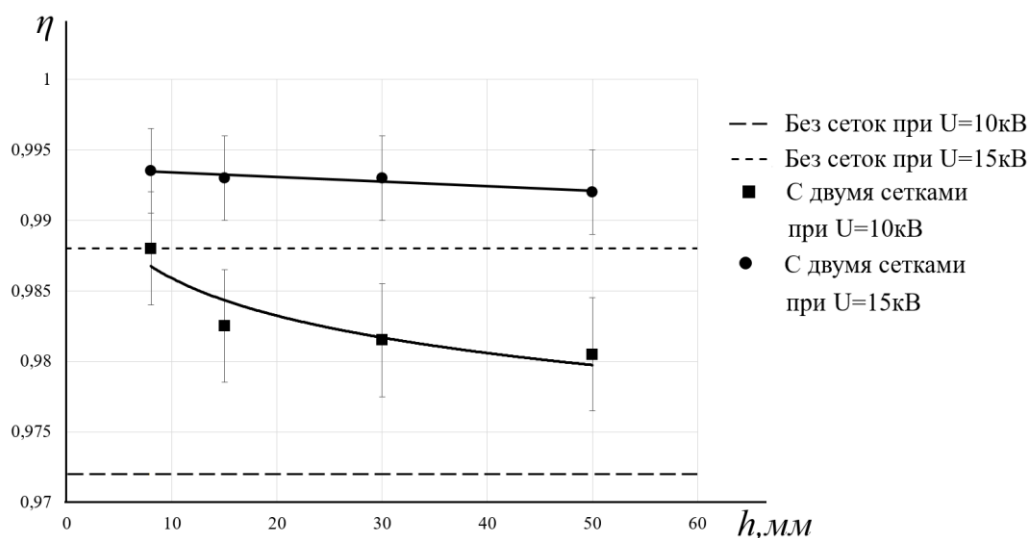


Рис. 10. Зависимость степени очистки от шага ячеек сеток: η – эффективность очистки, h – шаг сетки

Fig. 10. Dependence of the degree of cleaning on the mesh pitch: η - cleaning efficiency, h - mesh pitch

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

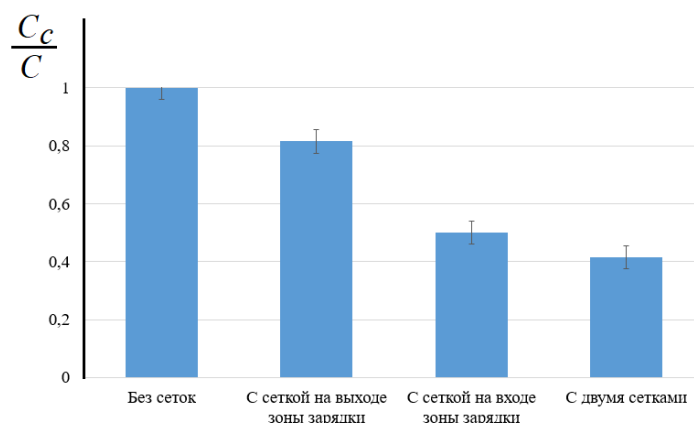


Рис. 11. Относительная концентрация озона на выходе электрофилтра при различных вариантах установки сеток: C_c – концентрация озона в фильтре с сетками; C – концентрация озона в фильтре без сеток

Fig. 11: Relative ozone concentration at the ESP outlet at different variants of screens installation: C_c - ozone concentration in the filter with screens; C - ozone concentration in the filter without screens

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для взрывоопасных помещений использование электрофильтров с коронным разрядом не безопасно [36]. Существует электростатический фильтр, в котором отсутствует зона зарядки. Электростатический фильтр (ЭСФ) состоит из нескольких основных компонентов. В корпусе фильтра размещены осадительные электроды, выполненные из диэлектрических листов (рис. 12). Диэлектрические осадительные электроды расположены параллельно друг другу и подключены к источнику высокого напряжения. На одни пластины подается положительный потенциал источника питания, на другие - отрицательный, таким образом, что пластины чередуются.

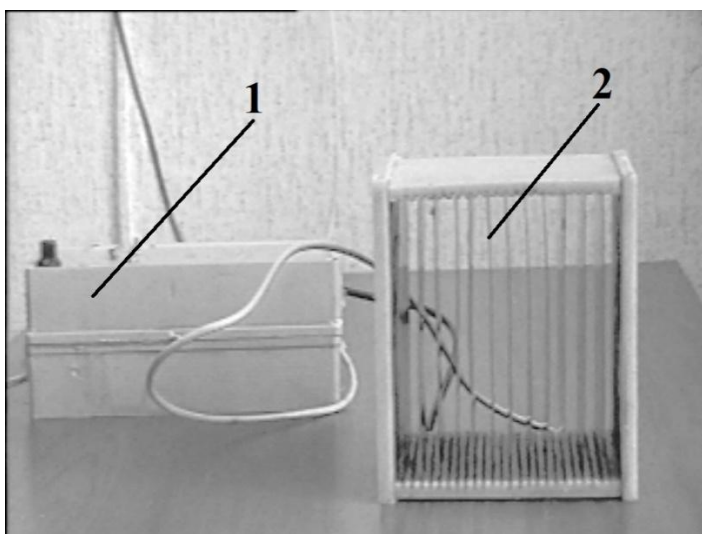


Рис. 12. Ячейка электростатического фильтра с источником питания: 1 – источник высокого напряжения, 2 – осадительные пластины

Fig. 12. Electrostatic filter cell with power supply: 1 - high voltage source, 2 - precipitation plates

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Частицы аэрозоля в воздухе помещения имеют естественный заряд, получаемый в процессе существования частицы. Электрическое поле воздействует на это заряд и заставляет частицу осадиться на пластины [37].

Такой фильтр не генерирует озон. Одним из главных его недостатков является низкая производительность. Использование таких фильтров целесообразно в малообъемных помещениях [38].

Одним из главных недостатков всех фильтров является ограниченная пылеемкость, и электрофильтр не исключение [39]. Для очистки воздушных фильтров необходима остановка системы очистки воздуха и очистка путем встряхивания, либо промывки фильтрующих элементов. Это создает определенные неудобства во время эксплуатации

системы очистки воздуха, особенно во время круглосуточной работы в производственных помещениях. Загрязнение фильтра приводит к снижению его эффективности и повышению концентрации загрязнений в помещении.

В работе [40] предложена конструкция мокрого электрофильтра, у которого отсутствует вышеуказанный недостаток. Основными отличительными элементами конструкции данного фильтра являются круглые осадительные электроды (рис. 13). Эти электроды выполнены из материалов, устойчивых к воздействию жидкости, например, из нержавеющей стали. Они размещаются вертикально и параллельно друг другу, верхней частью образуя зону, через которую проходит загрязненный воздух [41].

Осадительные электроды нижней частью погружены в жидкую среду, которая может быть водой или другой жидкостью. Эта среда служит для очистки осадительных электродов от осевших на них аэрозольных частиц. Осадительные электроды непрерывно вращаются и проходя через жидкость - очищаются, поддерживая неизменной эффективность фильтрации. Кроме этого, жидкость, находящаяся в электрофильтре, является сорбентом для газов. Данный электрофильтр позволяет очищать воздух от аммиака и сероводорода [42]. Загрязненная жидкость, содержащая осевшие частицы, удаляется из системы и подвергается процессу очистки.

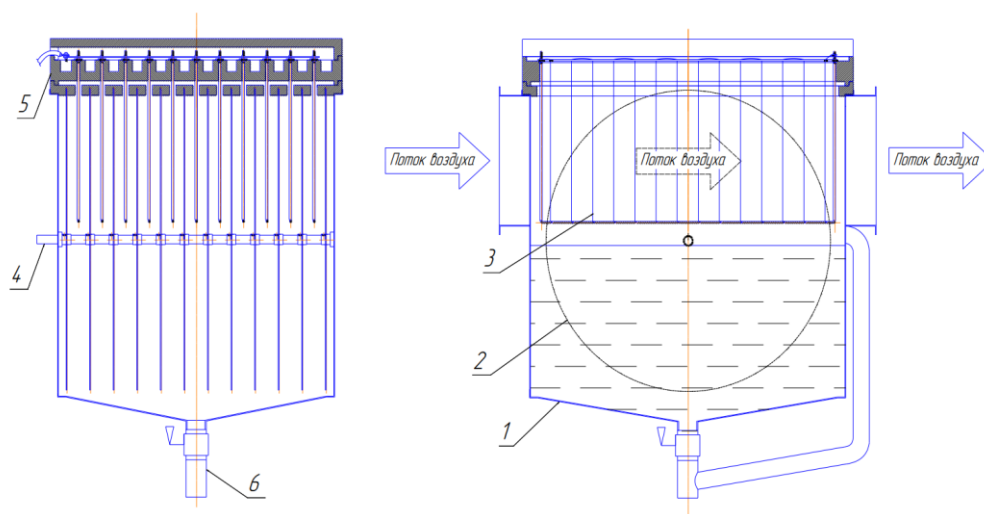


Рис. 13. Конструкция мокрого однозонного электрофильтра: 1 – корпус; 2 – осадительные электроды; 3 – коронирующие электроды; 4 – вал электрофильтра; 5 – изоляционная плита; 6 – сливной клапан

Fig. 13. Design of a wet single-zone ESP: 1 - housing; 2 - precipitation electrodes; 3 - corona electrodes; 4 - ESP shaft; 5 - insulating plate; 6 - drain valve

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Эффективность измеряется как процент удаления частиц определенного размера. Испытания, направленные на измерения эффективности были проведены на опытном образце в производственных условиях. Результаты показали эффективность очистки от пылевых и аэрозольных частиц (до 95,4 %), аммиака (до 83,8 %) и сероводорода (до 50,0 %) [43].

Скорость воздушного потока при проведении испытаний находилась в диапазоне от 0,5...2,5 м/с. Это оптимальная скорость для эффективного осаждения твердых частиц на поверхности электродов. Увеличение скорости воздушного потока приводит к ухудшению показателей эффективности работы электрофильтра.

Существенное повышение технических характеристик, таких как скорость воздушного потока позволяет двухступенчатый мокрый электрофильтр (рис. 14).

Двухступенчатый мокрый электрофильтр (ДМЭФ) - это электрофильтр, который состоит из двух последовательно установленных мокрых электрофильтров для повышения эффективности очистки [44]. Первая ступень включает в себя осадительные электроды, расположенные на расстоянии h_1 друг от друга. Осадительные электроды второй ступени расположены на расстоянии h_2 друг от друга. Соблюдено условие, что $h_1 > h_2$. Первая ступень служит для улавливания крупных частиц, вторая – для улавливания мелких частиц [45].

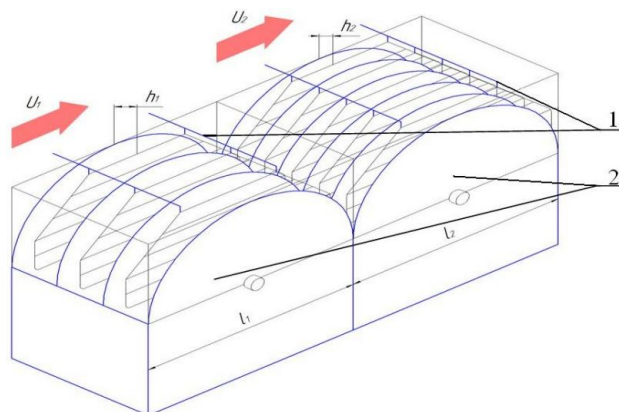


Рис. 14. Схема двухступенчатого мокрого электрофильтра: для 1-й и 2-й ступеней ДМЭФ соответственно: h_1 , h_2 - межэлектродное расстояние, м; u_1 , u_2 - скорость воздушного потока, м/с; l_1 , l_2 - активная длина электрофильтра; 1 – коронирующие электроды, 2 – осадительные электроды

Fig. 14. Scheme of two-stage wet electrostatic precipitator: for the 1st and 2nd stages of DMEF respectively: h_1 , h_2 - interelectrode distance, m; u_1 , u_2 - air flow velocity, m/s; l_1 , l_2 - active length of electrostatic precipitator; 1 - corona electrodes, 2 - precipitation electrodes

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Каждая ступень ДМЭФ заполнена оmyвающей жидкостью, необходимой не только для очистки осадительных электродов, но и для абсорбции газовых составляющих. Таким образом первая ступень очищает воздух от аэрозольных частиц и первого газа, вторая ступень очищает от аэрозольных частиц и второго газа [46].

В результате производственной проверки опытного образца ДМЭФ установлено, что эффективность очистки рециркуляционного воздуха выше, чем у мокрого однозонного электрофильтра и составляет от пылевых и аэрозольных частиц размером 0,3...10 мкм - 51,9...91,5 %, от аммиака – не менее 37 %, от сероводорода – не менее 80 % при скорости воздушного потока 5,5 м/с [47].

Одним из основных способов переноса микроорганизмов и передачи инфекции является аэрогенный способ, т.е. воздушным путем. Проблема обеззараживания воздуха становится особенно актуальной в контексте здравоохранения, общественного здоровья и в промышленных секторах, где важно поддерживать чистоту воздуха для предотвращения распространения инфекций, защиты от воздушно-передаваемых бактерий и вирусов, а также для обеспечения безопасных условий работы [48].

Озон относится к сильнейшим окислителям, за счет чего и способен справляться фактически со всеми известными микроорганизмами. Для того чтобы его свойства стали очевидными, необходимо достичь определенного уровня концентрации. Озонирование производственных помещений было широко использовано для дезинфекции воздуха и поверхностей. Озон (O_3) является сильным окислителем и способен уничтожать микроорганизмы, такие как бактерии, вирусы, и грибки [49].

В последние годы также акцентировалось внимание на аэрозольной трансмиссии вирусов, особенно в свете пандемии COVID-19. Некоторые исследования показывают, что ковид может передаваться через микрочастицы, которые могут оставаться в воздухе некоторое время. В этом контексте, дезинфекция воздуха может быть одним из мероприятий для снижения риска передачи вирусов [50].

Для повышения эффективности очистки воздуха от микроорганизмов существует электрофильтр – озонатор, с повышенным выделением озона [51] (рис. 15).

Конструкция электрофильтра озонатора включает в себя две основные части: озонирующую камеру и электрофильтрационный блок (рис. 15). В озонаторной камере генерируется озон. Озонатор содержит проволочные коронирующие электроды, которые активируют молекулы кислорода (O_2), разбивая их на отдельные атомы, которые затем соединяются с другими молекулами кислорода, образуя озон (O_3) [52].

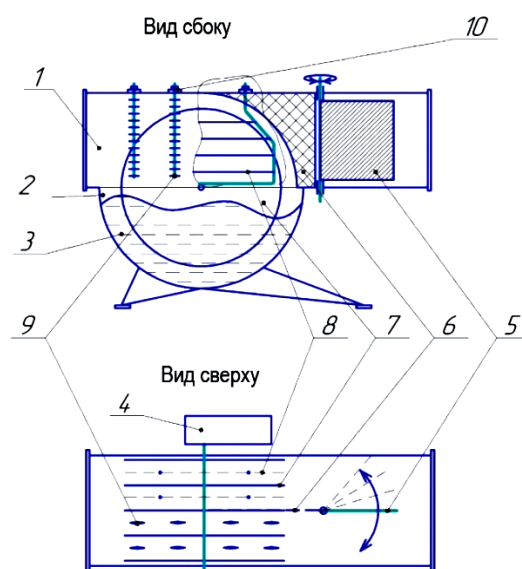


Рис.15. Конструкция электрофильтра озонатора:
1 – МЭФ верхняя часть; 2 – МЭФ нижняя часть; 3 – жидкость, омывающая осадительные электроды; 4 – мотор-редуктор вращения осадительных электродов; 5 – заслонка, управляющая воздушным потоком; 6 – перегородка; 7 – электроды осадительные; 8 – электроды коронирующие проволоочные; 9 – электроды коронирующие игольчатые; 10 – изолятор

Fig.15. Ozonator electrostatic precipitator design:
1 - MEF upper part; 2 - MEF lower part; 3 - liquid washing the precipitating electrodes; 4 - motor-reducer of precipitating electrodes rotation; 5 - flap controlling the air flow; 6 - partition; 7 - precipitating electrodes; 8 - corona wire electrodes; 9 - corona needle electrodes; 10 - insulator

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Другая часть системы - это электрофильтрационный блок, который состоит из игольчатых коронирующих электродов и круглых осадительных пластин. Электроды создают электрическое поле, которое приводит к ионизации молекул воздуха и образованию заряженных частиц. Под действием электростатических сил твердые частицы в воздухе становятся заряженными и прилипают к осадительным электродам [53]. Режим работы управляется заслонкой (рис. 16), в одном положении происходит очистки воздуха от аэрозольных частиц, в другом положении происходит повышенная генерация озона.

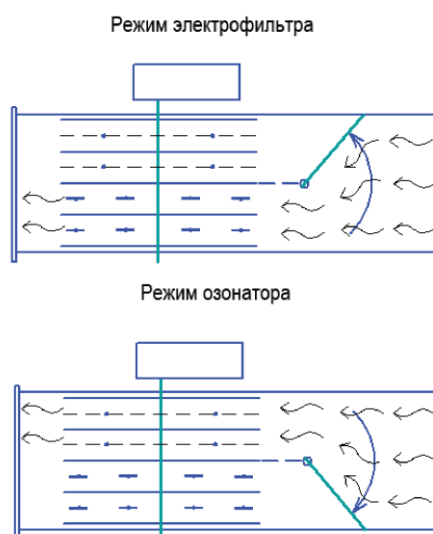


Рис. 16. Режимы работы МЭФ с функцией озонатора

Fig. 16. Operation modes of MEF with ozonator function

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В результате добавления воздушной заслонки, распределяющей воздушные потоки, применения проволочных и игольчатых коронирующих электродов, оставляя систему осадительных электродов неизменной, происходит увеличение озоногенерирования. Это обеспечивает повышение эффективности очистки и обеззараживания воздуха при сохранении остальных характеристик электрофильтра.

Обсуждение результатов (Discussing the results)

Таблица1

Table1

Сравнение электрофильтров
Comparison of electrostatic precipitators

Фильтр	Двух- зонный	С сеткой	Эл. статический	Одноступен- чатый мокрый	Двухступен- чатый мокрый	Озонатор
Выделение озона	Среднее	Низкое	Нет	Низкое	Низкое	Высокое
Максимальная скорость воздушного потока	2 м/с	2 м/с	0,7 м/с	2,5 м/с	5,5 м/с	2,5м/с
Очистка от вредных газов (аммиак сероводород)	нет	нет	нет	да	да	да
Обеззараживание воздуха	Среднее	Среднее	нет	Среднее	Среднее	Высокое
Непрерывная регенерация	нет	нет	нет	да	да	да
Размер улавливаемых частиц, мкм	до 2,5	до 2,5	до 5	до 0,5	до 0,1	до 2,5

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Результаты сравнения показали, что наиболее эффективным аппаратом для очистки воздушной среды производственных помещений является мокрый электрофильтр. Анализ экспериментальных данных показал, что для уменьшения вредного влияния озона необходимо использовать игольчатые коронирующие электроды на отрицательной короне. При этом генерация озона наименьшая. Кроме того, данный фильтр очищает воздух от вредных газов (сероводород, аммиак).

Для взрывоопасных малообъемных помещений, где применение коронного разряда недопустимо, целесообразно применять электростатический фильтр, в котором отсутствует зона зарядки.

Для помещений большого объема, целесообразно использовать мокрый многоступенчатый электрофильтр, который обладает повышенными эксплуатационными характеристиками, такими как скорость воздушного потока и эффективность очистки.

Для помещений, где необходимо обеззараживать воздух, целесообразно применение электрофильтра – озонатора. Электрофильтр-озонатор обеззараживает воздух и очищает его от вредных газов и микроорганизмов.

Заключение (Conclusions)

Одним из наиболее эффективных аппаратов очистки воздуха является электрофильтр. Существует множество разновидностей электрофильтров в зависимости от области их применения.

Применение электрофильтров для очистки воздушной среды помещений обосновано многими исследователями.

Выбор конструкции электрофильтра зависит от того, в каком помещении применяется электрофильтр и от каких вредных составляющих необходимо очистить воздушную среду помещения.

Наиболее эффективным электрофильтром для очистки воздушной среды производственных помещений является многоступенчатый мокрый электрофильтр, позволяющий очищать большие объемы воздуха от пыли, вредных газов (аммиак и сероводород) и микроорганизмов.

Литература

1. Гутор Е. М., Жидкова Е. А., Гуревич К. Г., Зибарев Е.В., Вострикова С. М., Астанин П.А. Некоторые подходы и критерии оценки риска развития профессиональных заболеваний //Медицина труда и промышленная экология. 2023. Т. 63. №. 2. С. 94-101.
2. Иванов Н. Н., Мармулева Н. И. Динамика профессиональных заболеваний и травматизма в российской федерации и новосибирской области //Теория и практика современной аграрной науки. 2023. С. 628-632.
3. Смирнова К. М., Умаров Д. Т. Анализ профессиональной заболеваемости в российской федерации // Студент и наука: актуальные вопросы современных исследований. 2023. С. 226-230.
4. Ахмедова Д. Б., Хаширбаева Д. М. Общепринятые и нетрадиционные методы терапии профессиональных заболеваний легких и их предупреждение. – 2023. С. 41-51.
5. Manisalidis I. et al. Environmental and health impacts of air pollution: a review //Frontiers in public health. – 2020. – Т. 8. – С. 14.
6. Glencross D. A. et al. Air pollution and its effects on the immune system //Free Radical Biology and Medicine. – 2020. – Т. 151. – С. 56-68.
7. Seibert R. et al. Air pollution sources' contribution to PM2. 5 concentration in the northeastern part of the Czech Republic //Atmosphere. – 2020. – Т. 11. – №. 5. – С. 522.
8. Tran V. V., Park D., Lee Y. C. Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality //International journal of environmental research and public health. – 2020. – Т. 17. – №. 8. – С. 2927.
9. Labaki W. W., Han M. L. K. Chronic respiratory diseases: a global view //The Lancet Respiratory Medicine. – 2020. – Т. 8. – №. 6. – С. 531-533.
10. Алдаков М. О. Аналитический обзор вентиляционных систем, используемых в гражданском строительстве //Качество в производственных и социально-экономических системах. – 2021. – С. 28-31.
11. Возмилов А. Г., Суринский Д. О., Лисов А. А., Панишев С. А., Шухов А. М. Очистка вытяжного воздуха в промышленном птицеводстве // АПК России. 2021. Т. 28(4). С. 466-471
12. Ашимов Б. Е. и др. Оценка эффективности работы электрофильтров //Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2021. – №. 3 (3). – С. 38-41.
13. Едимичев Д. А. и др. К вопросу об использовании электрофильтров в системе вентиляции цеха по производству серы для улавливания серной пыли //Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2020. – №. 2. – С. 12-19.
14. Altun A. F., Kilic M. Utilization of electrostatic precipitators for healthy indoor environments //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – Т. 111.
15. Балашов А. М. Совершенствование процессов улавливания аэрозольных загрязнителей на агропромышленных предприятиях //Тенденции развития науки и образования. – 2020. – №. 67-2. – С. 66-69.
16. Muzafarov S. et al. Improving the efficiency of electrostatic precipitators //International Journal of Energy for a Clean Environment. – 2020. – Т. 21. – №. 2.
17. Chen L. et al. Electrostatic precipitator for fine and ultrafine particle removal from indoor air environments //Separation and Purification Technology. – 2020. – Т. 247. – С. 116964.
18. Калюжин С. Л., Коптев А. С., Ленякин А. В. Применение электрофильтров для обеспечения будущих Европейских норм выбросов //Цемент и его применение. – 2019. – №. 4. – С. 78-81.
19. Васина М. В. и др. Модернизация системы очистки отходящих дымовых газов на катализаторной фабрике //ББК 31 А43 Редакционная коллегия: АВ Косых, ректор ОмГТУ. – 2020. – С. 109.
20. Kılıç M., Mutlu M., Altun A. F. Numerical simulation and analytical evaluation of the collection efficiency of the particles in a gas by the wire-plate electrostatic precipitators //Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 13. – С. 6401.
21. Котов Б. И., Грищенко В. А. Функционирование трубчатых электрофильтров для очистки воздушных потоков вентиляционных выбросов от пыли. – 2021.
22. Сибилева Д. А. Очистка вентиляционных выбросов и дымовых газов от твердых фракций различных размеров //Поколение будущего: Взгляд молодых ученых-2020. – 2020. – С. 76-79.
23. Xu J. et al. Performances of a new type high-temperature tubular electrostatic precipitator with rare-earth tungsten cathode //Separation and Purification Technology. – 2022. – Т. 280. – С. 119820.
24. Василенко Д. А., Скорик В. Г. Современные технические решения реконструкции электрофильтров ТЭЦ //Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. – 2023. – С. 303-306.
25. Li X. et al. Summary of research progress on industrial flue gas desulfurization technology //Separation and Purification Technology. – 2022. – Т. 281. – С. 119849.

26. Туляков Е. И., Максимович В. М. Методы очистки от угольной пыли уходящих дымовых газов на ТЭЦ //Современное состояние и перспективы развития науки и образования: проблемы и решения. – 2023. – С. 50-57.
27. Возмилов А. Г. и др. Проблемы загрязнения воздуха в животноводстве и пути их решения //Вестник НГИЭИ. – 2021. – №. 9 (124). – С. 38-49.
28. Возмилов А. Г. и др. Исследование трибоэлектрического генератора для питания двухзонного электрофильтра //Вестник НГИЭИ. – 2022. – №. 1 (128). – С. 22-37.
29. Двухзонный электрофильтр: Патент РФ № 2144433 / Файн В.Б., Звездакова О.В., Дель М.В. - № 98117986; Заявл. 30.09.1998; Оpubл. 20.01.2000. - Бюл. № 2.
30. Шлюпиков С. В., Герасимов А. С. Электрофильтры для очистки и обеззараживания воздуха в животноводческих комплексах //Актуальные проблемы энергетики АПК. – 2021. – С. 269-273.
31. Pandiselvam R. et al. A comprehensive review of impacts of ozone treatment on textural properties in different food products //Trends in Food Science & Technology. – 2022. – Т. 127. – С. 74-86.
32. Wang X. Effects of corona wire distribution on characteristics of electrostatic precipitator //Powder Technology. – 2020. – Т. 366. – С. 36-42.
33. Возмилов А. Г., Звездакова О. В. Электроочистка и электрообеззараживание воздуха в технологических процессах АПК //Вестник Челябинской государственной агроинженерной академии. – 2013. – Т. 66. – С. 14-24.
34. Двухзонный электрофильтр: Патент РФ № 2144433 /Файн В.Б., Звездакова О.В., Дель М.В. - № 98117986; Заявл. 30.09.1998; Оpubл. 20.01.2000. - Бюл. № 2.
35. Звездакова О. В. Совершенствование двухзонного электрофильтра для очистки воздуха от пыли в сельскохозяйственных помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздушной среды : дис. – Челябинск, 2009, 2009.
36. Zeng Y. et al. Simultaneous removal of multiple indoor-air pollutants using a combined process of electrostatic precipitation and catalytic decomposition //Chemical Engineering Journal. – 2020. – Т. 388. – С. 124219.
37. Vozmilov A., Ilimbetov R., Panishev S. Development of a Mathematical Model of the Electric Field Strength of an Electrostatic Filter Based on Experimental Data //2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2023. – С. 890-894.
38. Возмилов А. Г. и др. Математическая модель электростатического фильтра для очистки воздушной среды в малообъемных помещениях АПК //Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2023. – №. 8 (226). – С. 77-83.
39. Zhang X., Bo T. The effectiveness of electrostatic haze removal scheme and the optimization of electrostatic precipitator based on the charged properties of airborne haze particles: Experiment and simulation //Journal of Cleaner Production. – 2021. – Т. 288. – С. 125096.
40. Слободскова А. А. и др. К вопросу эффективности мокрого электрофильтра при очистке воздуха //Эффективность применения инновационных технологий и техники в сельском и водном хозяйстве. – 2020. – С. 411-413.
41. Фомичёв Д. Н., Пиркин А. Г. Электрофильтр для очистки воздуха в животноводческих помещениях //Интеллектуальный потенциал молодых ученых как драйвер развития АПК. – 2021. – С. 388-390.
42. Altun A. F., Kilic M. Utilization of electrostatic precipitators for healthy indoor environments //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – Т. 111.
43. Возмилов А.Г., Суринский Д.О., Лисов А.А., Панишев С.А., Шухов А.М. / Очистка вытяжного воздуха в промышленном птицеводстве // АПК России. 2021. Т. 28. № 4. С. 466-471.
44. Badran M., Mansour A. M. Evaluating performance indices of electrostatic precipitators //Energies. – 2022. – Т. 15. – №. 18. – С. 6647.
45. Жеребцов Б.В. // Проблема очистки воздуха в промышленном животноводстве от сероводорода /Эпоха науки. 2017. № 9. С. 158-162.
46. Tański M., Berendt A., Mizeraczyk J. Closed SDBD-driven two-stage electrostatic precipitator //Journal of Cleaner Production. – 2019. – Т. 226. – С. 74-84.
47. Возмилов А. Г. и др. Использование двухступенчатого мокрого электрофильтра в системах очистки рециркуляционного воздуха в производственных помещениях сельского хозяйства с целью снижения заболеваемости рабочих //Вестник НГИЭИ. – 2022. – №. 5 (132). – С. 45-54.
48. Мануйленко А. Н., Вендин С. В. Достоинства и недостатки применения электротехнологии озонирования воздуха в животноводческих помещениях //Актуальные вопросы энергетики. – 2019. – С. 24-27.
49. Шадеркин П. Н., Рябцев И. В. Применение электрофильтра-озонатора при выполнении

технологических процессов на предприятиях переработки сельскохозяйственной продукции. – 2022.

50. Сторчевой В. Ф., Будыгин А. М. Улучшение микроклимата путем применения УФ облучения и озонирования в животноводческих помещениях //Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума. – 2021. – С. 220.

51. Шадеркин П. Н., Рябцев И. В. Применение электрофильтра-озонатора при выполнении технологических процессов на предприятиях переработки сельскохозяйственной продукции. – 2022.

52. Андреев Л. Н., Басуматорова Е. А. Обоснование конструктивных параметров электрофильтра-озонатора //Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2019. – №. 3 (77). – С. 185-187.

53. Возмилов А. Г., Астафьев Д. В., Илимбетов Р. Ю. Использование озона для дезинфекции яиц и стимулирования эмбрионального развития цыплят в период инкубации //АПК России. – 2019. – Т. 26. – №. 5. – С. 811-817.

Авторы публикации

Возмилов Александр Григорьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-уральского государственного университета (НИУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1292-3975>. vozmiag@rambler.ru.

Илимбетов Рафаэль Юрикович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-уральского государственного университета (НИУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1634-9242>. ilimbay@yandex.ru.

Панишев Сергей Алексеевич – аспирант кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-уральского государственного университета (НИУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2753-2341>. panishev.serega@mail.ru.

Лисов Андрей Анатольевич – аспирант кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-уральского государственного университета (НИУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7282-8470>. lisov.andrey2013@yandex.ru.

References

1. Gutor E. M., Zhidkova E. A., Gurevich K. G., Zibarev E. V., Vostrikova S. M., Astanin P. A. Some approaches and criteria for assessing the risk of developing occupational diseases // Occupational Medicine and Industrial Ecology. 2023. T. 63. no. 2. pp. 94-101.
2. Ivanov N. N., Marmuleva N. I. Dynamics of occupational diseases and injuries in the Russian Federation and the Novosibirsk region // Theory and practice of modern agricultural science. 2023. pp. 628-632.
3. Smirnova K. M., Umarov D. T. Analysis of occupational morbidity in the Russian Federation // Student and science: current issues of modern research. 2023. pp. 226-230.
4. Akhmedova D. B., Khashirbaeva D. M. Conventional and non-traditional methods of therapy for occupational lung diseases and their prevention. – 2023. P. 41-51.
5. Manisalidis I. et al. Environmental and health impacts of air pollution: a review //Frontiers in public health. – 2020. – T. 8. – P. 14.
6. Glencross D. A. et al. Air pollution and its effects on the immune system //Free Radical Biology and Medicine. – 2020. – T. 151. – P. 56-68.
7. Seibert R. et al. Air pollution sources' contribution to PM_{2.5} concentration in the northeastern part of the Czech Republic //Atmosphere. – 2020. – T. 11. – No. 5. – P. 522.
8. Tran V. V., Park D., Lee Y. C. Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality //International journal of environmental research and public health. – 2020. – T. 17. – No. 8. – P. 2927.
9. Labaki W. W., Han M. L. K. Chronic respiratory diseases: a global view //The Lancet Respiratory Medicine. – 2020. – T. 8. – No. 6. – pp. 531-533.
10. Aldakov M. O. Analytical review of ventilation systems used in civil construction // Quality in production and socio-economic systems. – 2021. – pp. 28-31.
11. Vozmilov A.G., Surinsky D.O., Lisov A.A., Panishev S.A., Shukhov A.M. Purification of

- exhaust air in industrial poultry farming // Agroindustrial Complex of Russia. 2021. Т. 28(4). pp. 466-471
12. Ashimov B. E. et al. Evaluation of the efficiency of electric precipitators // Bulletin of Shakarim University. Technical science series. – 2021. – No. 3 (3). – pp. 38-41.
13. Edimichev D. A. et al. On the issue of using electric precipitators in the ventilation system of a sulfur production workshop to capture sulfur dust // Siberian Fire and Rescue Bulletin. – 2020. – No. 2. – pp. 12-19.
14. Altun A. F., Kilic M. Utilization of electrostatic precipitators for healthy indoor environments //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – Т. 111.
15. Balashov A. M. Improving the processes of capturing aerosol pollutants at agro-industrial enterprises // Trends in the development of science and education. – 2020. – No. 67-2. – pp. 66-69.
16. Muzafarov S. et al. Improving the efficiency of electrostatic precipitators //International Journal of Energy for a Clean Environment. – 2020. – Т. 21. – No. 2.
17. Chen L. et al. Electrostatic precipitator for fine and ultrafine particle removal from indoor air environments //Separation and Purification Technology. – 2020. – Т. 247. – P. 116964.
18. Kalyuzhin S. L., Koptev A. S., Lenyakin A. V. Application of electric precipitators to ensure future European emission standards // Cement and its application. – 2019. – No. 4. – pp. 78-81.
19. Vasina M.V. et al. Modernization of the flue gas purification system at a catalyst factory //BBK 31 A43 Editorial board: AV Kosykh, rector of Omsk State Technical University. – 2020. – P. 109.
20. Kılıç M., Mutlu M., Altun A. F. Numerical simulation and analytical evaluation of the collection efficiency of the particles in a gas by the wire-plate electrostatic precipitators //Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – No. 13. – P. 6401.
21. Kotov B. I., Grishchenko V. A. Functioning of tubular electrostatic precipitators for cleaning air flows of ventilation emissions from dust. – 2021.
22. Sibileva D. A. Purification of ventilation emissions and flue gases from solid fractions of various sizes // Generation of the Future: View of Young Scientists-2020. – 2020. – pp. 76-79.
23. Xu J. et al. Performances of a new type high-temperature tubular electrostatic precipitator with rare-earth tungsten cathode //Separation and Purification Technology. – 2022. – Т. 280. – P. 119820.
24. Vasilenko D. A., Skorik V. G. Modern technical solutions for the reconstruction of electric precipitators of thermal power plants // Youth and science: current problems of fundamental and applied research. – 2023. – P. 303-306.
25. Li X. et al. Summary of research progress on industrial flue gas desulfurization technology //Separation and Purification Technology. – 2022. – Т. 281. – P. 119849.
26. Tulyakov E. I., Maksimovich V. M. Methods for cleaning exhaust flue gases from coal dust at thermal power plants // Current state and prospects for the development of science and education: problems and solutions. – 2023. – P. 50-57.
27. Vozmilov A. G. et al. Problems of air pollution in livestock farming and ways to solve them // Bulletin of NGIEI. – 2021. – No. 9 (124). – pp. 38-49.
28. Vozmilov A. G. et al. Study of a triboelectric generator for powering a two-zone electrostatic precipitator // Bulletin of NGIEI. – 2022. – No. 1 (128). – P. 22-37.
29. Two-zone electrostatic precipitator: RF Patent No. 2144433 / Fain V.B., Zvszdkova O.V., Del M.V. - No. 98117986; Application 09/30/1998; Publ. 01/20/2000. - Bull. No. 2.
30. Shlyupikov S.V., Gerasimov A.S. Electric precipitators for cleaning and disinfecting air in livestock complexes // Current problems of agro-industrial complex energy. – 2021. – pp. 269-273.
31. Pandiselvam R. et al. A comprehensive review of impacts of ozone treatment on textural properties in different food products //Trends in Food Science & Technology. – 2022. – Т. 127. – P. 74-86.
32. Wang X. Effects of corona wire distribution on characteristics of electrostatic precipitator // Powder Technology. – 2020. – Т. 366. – P. 36-42.
33. Vozmilov A.G., Zvezdakova O.V. Electrical purification and electrical disinfection of air in technological processes of the agro-industrial complex // Bulletin of the Chelyabinsk State Agroengineering Academy. – 2013. – Т. 66. – P. 14-24.
34. Two-zone electrostatic precipitator: RF Patent No. 2144433 / Fain V.B., Zvezdakova O.V., Del M.V. - No. 98117986; Application 09/30/1998; Publ. 01/20/2000. - Bull. No. 2.
35. Zvezdakova O. V. Improvement of a two-zone electrostatic precipitator for cleaning air from dust in agricultural premises with increased requirements for clean air: dis. – Chelyabinsk, 2009, 2009.
36. Zeng Y. et al. Simultaneous removal of multiple indoor-air pollutants using a combined process of electrostatic precipitation and catalytic decomposition //Chemical Engineering Journal. – 2020. – Т.

388. – P. 124219.

37. Vozmilov A., Ilimbetov R., Panishev S. Development of a Mathematical Model of the Electric Field Strength of an Electrostatic Filter Based on Experimental Data //2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2023. – pp. 890-894.

38. Vozmilov A. G. et al. Mathematical model of an electrostatic filter for air purification in small premises of the agro-industrial complex // Bulletin of the Altai State Agrarian University. – 2023. – No. 8 (226). – P. 77-83.

39. Zhang X., Bo T. The effectiveness of electrostatic haze removal scheme and the optimization of electrostatic precipitator based on the charged properties of airborne haze particles: Experiment and simulation // Journal of Cleaner Production. – 2021. – T. 288. – P. 125096.

40. Slobodskova A. A. et al. On the issue of the effectiveness of a wet electrostatic precipitator for air purification // Efficiency of using innovative technologies and equipment in agriculture and water management. – 2020. – P. 411-413.

41. Fomichev D. N., Pirkin A. G. Electric precipitator for air purification in livestock buildings // Intellectual potential of young scientists as a driver for the development of the agro-industrial complex. – 2021. – P. 388-390.

42. Altun A. F., Kilic M. Utilization of electrostatic precipitators for healthy indoor environments //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – T. 111.

43. Vozmilov A.G., Surinsky D.O., Lisov A.A., Panishev S.A., Shukhov A.M. / Purification of exhaust air in industrial poultry farming // Agroindustrial Complex of Russia. 2021. T. 28. No. 4. P. 466-471.

44. Badran M., Mansour A. M. Evaluating performance indicators of electrostatic precipitators // Energies. – 2022. – T. 15. – No. 18. – P. 6647.

45. Zherebtsov B.V. // The problem of air purification in industrial livestock farming from hydrogen sulfide / Age of Science. 2017. No. 9. pp. 158-162.

46. Tański M., Berendt A., Mizeraczyk J. Closed SDBD-driven two-stage electrostatic precipitator // Journal of Cleaner Production. – 2019. – T. 226. – P. 74-84.

47. Vozmilov A.G. et al. The use of a two-stage wet electrostatic precipitator in recirculation air purification systems in industrial premises of agriculture in order to reduce the incidence of workers // Bulletin of NGIEI. – 2022. – No. 5 (132). – pp. 45-54.

48. Manuylenko A. N., Vendin S. V. Advantages and disadvantages of using electrotechnology for air ozonation in livestock premises // Current Issues of Energy. – 2019. – pp. 24-27.

49. Shaderkin P. N., Ryabtsev I. V. Application of an electrostatic precipitator-ozonator when performing technological processes at enterprises for processing agricultural products. – 2022.

50. Storchevoy V.F., Buldygin A.M. Improving the microclimate by using UV irradiation and ozonation in livestock buildings // Collection of scientific articles based on the results of the International Scientific Forum. – 2021. – P. 220.

51. Shaderkin P. N., Ryabtsev I. V. Application of an electrostatic precipitator-ozonator when performing technological processes at enterprises processing agricultural products. – 2022.

52. Andreev L.N., Basumatorova E.A. Justification of the design parameters of the electrostatic precipitator-ozonizer // News of the Orenburg State Agrarian University. – 2019. – No. 3 (77). – pp. 185-187.

53. Vozmilov A. G., Astafiev D. V., Ilimbetov R. Yu. Use of ozone to disinfect eggs and stimulate embryonic development of chickens during the incubation period // Agroindustrial Complex of Russia. – 2019. – T. 26. – No. 5. – pp. 811-817.

Authors of the publication

Alexander G. Vozmilov – Doctor of Engineering. Sciences, Professor of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1292-3975>. vozmiag@rambler.ru.

Rafael Yu. Ilimbetov – Ph.D. tech. Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1634-9242>. ilimbay@yandex.ru.

Sergey A. Panishev – graduate student of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2753-2341>. panishef.serega@mail.ru.

Andrey A. Lisov – graduate student of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7282-8470>. lisov.andrey2013@yandex.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы.

Получено 23.01.2024 г.

Отредактировано 21.02.2024 г.

Принято 27.02.2024 г.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА



УДК 621.31

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-1-97-104

АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В СИГНАЛЕ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Бурянина¹ Н.С., Лесных² Е.В., Лесных³ А.С., Суслов^{4,5} К.В., Артемьева⁶ М.Л.

¹Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова,
г. Якутск, Россия

²Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Россия

³Сибирский государственный университет водного транспорта,
г. Новосибирск, Россия

⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

⁵Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

⁶Чукотский филиал Северо-Восточного федерального университета имени М.К.
Аммосова, г. Анадырь, Россия
ml.koryakina@s-vfu.ru

Резюме: Предложен алгоритм исключения аperiodических составляющих из токов коротких замыканий (КЗ). Реализуется алгоритм вычислительной техникой и позволяет определять место КЗ и обрыва фазы за 0,5 – 0,6 миллисекунды. За такой интервал времени не возникает насыщение магнитопроводов трансформаторов тока (ТТ), и в микропроцессор цифровой релейной защиты поступает неискаженная информация от ТТ. Для реализации алгоритма достаточно четырех измерений мгновенных значений токов, разделенных одинаковыми временными интервалами (интервалами дискретизации). Исключение аperiodических составляющих повышает точность определения места КЗ. Алгоритм может использоваться для определения места разрыва фаз. Также данный алгоритм можно применить в цифровых релейных защитах, основанных на измерении токов и напряжений.

Ключевые слова: искажение вторичных токов при насыщении магнитопроводов трансформаторов тока; фильтрация свободной составляющей тока; интервал дискретизации; алгоритмы определения текущих значений синусоидальных составляющих токов; постоянная времени затухания свободной составляющей тока; определение мест повреждений (ОМП) на линиях электропередачи.

Для цитирования: Бурянина Н.С., Лесных Е.В., Лесных А.С., Суслов К.В., Артемьева М.Л. Алгоритм фильтрации аperiodической составляющей в сигнале тока короткого замыкания // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 97-104. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-97-104.

ON THE QUESTION OF DETERMINING THE LOCATION OF A SHORT CIRCUIT ON A POWER TRANSMISSION LINE

Buryanina ¹ N.S., Lesnykh ² E.V., Lesnykh ³ A.S., Suslov ^{4,5} K.V., Artemyeva ⁶ M.L.

¹North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

²Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

³Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

⁵National Research University MPEI, Moscow, Russia

⁶Chukotka branch of North-Eastern Federal University, Anadyr, Russia
ml.koryakina@s-vfu.ru

Abstract: An algorithm for eliminating aperiodic components from short circuit (SC) currents is proposed. The algorithm is implemented by computer technology and allows you to determine the location of a short circuit and phase loss in 0.5 - 0.6 milliseconds. During such a time interval, saturation of the magnetic circuits of current transformers (CTs) does not occur, and the processors receive undistorted information from the CTs. To implement the algorithm, four measurements of instantaneous current values, separated by equal time intervals (sampling intervals), are sufficient. Elimination of aperiodic components increases the accuracy of determining the location of the fault. The algorithm can be used to determine the location of phase failure, and in digital relay protection based on measuring currents and voltages.

Keywords: distortion of secondary currents when magnetic circuits of current transformers are saturated; filtering of the free current component; sampling interval; algorithms for determining the current values of sinusoidal current components; attenuation time constant of the free current component; determination of fault locations on power lines.

For citation: Buryanina NS., Lesnykh EV., Lesnykh AS., Suslov KV., Artemyeva ML. On the question of determining the location of a short circuit on a power transmission line. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (2): 97-104. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-97-104.

Введение (Introduction)

Исторически сложилось так, что в СССР, а затем и в России существовала система, где при проектировании релейной защиты и автоматизации воздушных линий электропередач в качестве основной защиты брали дифференциальную защиту, так как она играет особую роль и ей присваивается абсолютная селективность для воздушных линий электропередачи 110-750 кВ. Высокоскоростная дифференциальная фазовая защита с высокочастотным каналом связи и надлежащим функционированием во многом определяет надежность работы единой энергетической системы [10].

В настоящее время повсеместно аналоговые релейные защиты, автоматика (РЗА) и устройства определения мест повреждений (ОМП) заменяются цифровыми. Цифровое управление расширяет возможности РЗА, позволяет использовать информацию для РЗ не только в месте установки защищаемого объекта, но и удаленную [3, 8, 9]. Например, направленные защиты генераторов могут использовать напряжения других генераторов, трансформаторов и даже линий электропередачи, удаленных от места установки генераторов, но имеющих электрическую связь с поврежденными генераторами. Цифровое управление позволяет фильтровать синусоидальные составляющие токов и напряжений, вычислять мощности, сопротивления на выходе измерительных органов РЗ (ИОРЗ), фиксируя параметры режима в начальном периоде КЗ (0,2 – 0,25 миллисекунды) [1, 2, 4, 11, 14, 15].

В отличие от аналоговых защит, выполняемых электромеханическими и электронными реле и получаемыми режимную информацию непрерывно, цифровые защиты реагируют на дискретные параметры, разделенные равными интервалами времени, называемые интервалами дискретизации. Поэтому очень важно из дискретных и часто несинусоидальных параметров режима выделить синусоидальные составляющие.

Существенные преимущества цифровых защит перед аналоговыми проявляются в дифференциальных защитах генераторов, трансформаторов, шин. Применяемые аналоговые защиты имеют время срабатывания 40 – 50 мс. Разработчики цифровых РЗ за рубежом и в России предложили использовать информацию на участках достаточно точной трансформации, что позволило разработать алгоритмы с временем фиксации КЗ в 2 – 3 мс. Т.е., интервал точной трансформации в 3 мс достаточен для измерительного органа цифровой РЗ [5, 6, 7, 12].

Подстанции и линии электропередачи Северных электрических сетей разбросаны по обширной территории. Для анализа проблемы работы устройств РЗА, в частности работы ЦРЗА и ОМП, стоит начать с качественного и количественного состава оборудования, используемого на объектах электроэнергетики. Например, исходя из данных группы компаний ПАО «Россети» на 01.01.2022 на объектах электроэнергетического хозяйства в эксплуатации находится около 1,8 миллионов устройств РЗА. Распределение устройств РЗА по составу элементной базы приведено на рисунке 1 [13]. Так, филиал «Северные электрические сети» ОАО «Чукотэнерго» снабжают электроэнергией Чаунский и Билибинский районы Чукотского автономного округа, а также Нижнеколымский улус Якутии. Центральная база и управление Северных электрических сетей расположена в городе Билибино. Основные структурные

подразделения предприятия: служба линий электропередачи, служба ПС и ТП, оперативно-диспетчерская служба, автотранспортный цех, служба РЗАИ, служба СДТУ, Чаунский район электрических сетей в г. Певек и Зеленомысский участок электрических сетей в п. Черский Республики Саха (Якутия).

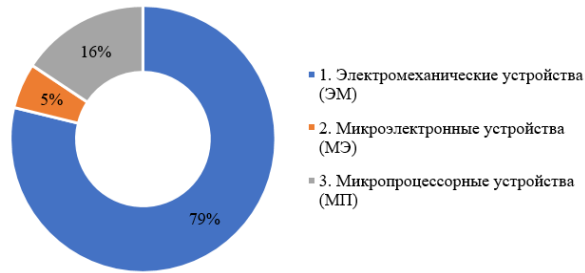


Рис.1. Распределение устройств РЗА по составу элементной базы Fig.1. Distribution of relay protection devices by element base composition

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Следовательно, точность определения места повреждения на линиях электропередачи изолированных территорий Крайнего Севера играет важную роль.

Научная значимость исследования состоит в повышении точности определения места короткого замыкания на линиях электропередачи за счет фильтрации помех в виде апериодической (свободной) составляющей тока короткого замыкания. Практическая значимость исследования заключается в том, что предложенный алгоритм может использоваться и для определения места разрыва фаз, и в цифровых релейных защитах, основанных на измерении токов и напряжений, он может быть внедрен в измерительный орган микропроцессорных устройств РЗА в качестве цифрового фильтра.

Материалы и методы (Materials and methods)

Рассмотрим ситуацию, когда магнитопроводы трансформаторов тока насыщаются через 3,0 – 4,0 мс. Алгоритм, исключая апериодические составляющие токов КЗ, предлагается ниже.

Ток КЗ равен сумме апериодической и синусоидальной составляющих:

$$i_{\text{КЗ}}(t) = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \varphi) - I_{\text{ма}} \cdot \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{\frac{-t}{T}} \quad (1)$$

где $i_{\text{КЗ}}(t)$ – мгновенное значение тока КЗ в момент времени t , I_m – амплитудное значение тока, φ – угол между током и напряжением, $I_{\text{ма}}$ – значение апериодической составляющей тока КЗ в начальный момент времени, ω – угловая частота, ψ – начальный угол тока КЗ, T – постоянная времени, t – текущее время.

$$i_1(t) = \frac{2 \cdot i(2 \cdot \Delta t) - i(\Delta t) - i(3 \cdot \Delta t)}{4 \cdot \sin(\omega \cdot \Delta t / 2)^2}, \quad i_2(t) = \frac{2 \cdot i(3 \cdot \Delta t) - i(2 \cdot \Delta t) - i(4 \cdot \Delta t)}{4 \cdot \sin(\omega \cdot \Delta t / 2)^2} \quad (2)$$

Постоянная времени апериодической слагающей тока КЗ определим, как:

$$T_r = \frac{-\Delta t}{\ln \frac{i_2 - i(3 \cdot \Delta t)}{i_1 - i(2 \cdot \Delta t)}} \quad (3)$$

Угол φ_r определим через угловую частоту и вычисленную постоянную времени:

$$\varphi_r = \text{acrtg}(T_r \cdot \omega) \quad (4)$$

Апериодическая составляющая определится как:

$$i_A(t) = I_m \cdot [-\sin(\psi - \varphi)] \cdot e^{-t/T_r} \quad (5)$$

Синусоидальная составляющая равна:

$$i_{\text{sin}}(t) = i_{\text{КЗ}}(t) - i_A(t) \quad (6)$$

Комплексные значения напряжения и тока в момент времени t равны:

$$\dot{u}(t) = \sqrt{u(t) \cdot \sin(\omega t + \psi + \varphi)^2 + u(t) \cdot \sin(\omega t + \psi - \varphi)^2} \cdot e^{j\varphi_r} \quad (7)$$

Алгоритм написан на программе MathCAD и переведен на язык

программирования C++. Ниже приводится часть листинга программы (рис. 2).

```
#define PI 3.14159268
// Задается амплитуда тока, частота, круговая частота, угол напряжения, время затухания
// тока, шаг по времени и фазовый угол в единицах СИ
double I0=10.0, nu0=50, w0=2*PI*nu0, ksi0=PI/2.0, Tau0=1.0/nu0, dt=Tau0/50.0,
phi0=atan(Tau0*w0);
// Создаются переменные для определения параметров расчетной кривой тока
double I1, nu1, ksi1, phi1, Tau1, w1;
// Определяются массивы
const int N = 100;
double iE[N], iP[N], it[N];
```

Рис. 2. Фрагмент листинга программы алгоритма исключения аperiodической составляющей

Fig. 2. Program listing fragment of the algorithm for aperiodic component elimination

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты (Results)

В качестве примера рассмотрим короткое замыкание на шинах генератора (рис. 3) с параметрами: мощность генераторов – 120 МВт, номинальное напряжение – 10,5 кВ, $\cos \varphi = 0,85$, $X_d'' = 0,189$, $X_2 = 0,23$. Постоянная времени обмоток статора составляет 0,01 с. Параметры трехобмоточного трансформатора: ТДЦ-250/220: Мощность – 250 МВА, номинальное напряжение высшей обмотки – 242 кВ, среднего напряжения – 37,5 кВ, низшего напряжения – 10,5 кВ, $U_{kv-c} = 11\%$, $U_{kv-n} = 24\%$, $U_{k c-n} = 36\%$, $\Delta P_{kz} = 0,6$ МВт, $\Delta P_{xx} = 0,207$ МВт, обмотки высшего напряжения заземлены. Параметры линии: $L = 100$ км, $R = 0,33$ ом/км, $X = 0,36$ ом/км.

Амплитуда периодической составляющей составляет 23,7 кА. Четыре измерения с момента возникновения короткого замыкания: интервал отсчета 0,625 мс: $i(\Delta t) = 0,468$ кА, $i(2\Delta t) = 1,82$ кА, $i(3\Delta t) = 3,939$ кА, $i(4\Delta t) = 6,702$ кА. Согласно (1 – 5) постоянная времени с точностью до 5 символов составляет $T = 0,00955$ с.

Расчетные токи и мощности во времени приведены на рисунках 3 и 4.

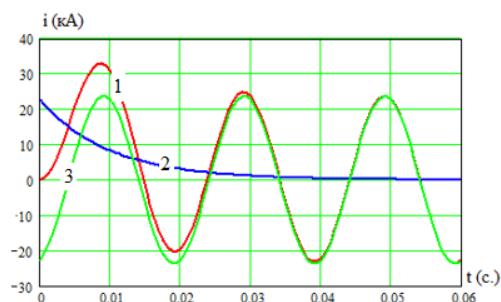


Рис. 3. Ток короткого замыкания (1), вычисленные аperiodическая (2) и периодическая составляющие

Fig. 3. Short-circuit current (1), calculated aperiodic (2) and periodic components

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

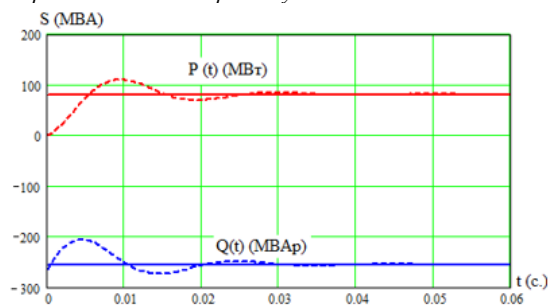


Рис. 4. Расчетная мощность. Пунктирная линия - произведение напряжения на сопряженный комплекс тока без исключения аperiodической составляющей, сплошная линия – произведение напряжения на сопряженный комплекс тока с исключенной аperiodической составляющей (согласно предложенному алгоритму)

Fig. 4. Calculated power. Dotted line - voltage product on the conjugate current complex without excluding the aperiodic component, solid line - voltage product on the conjugate current complex with excluded aperiodic component (according to the proposed algorithm)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Обсуждение (Discussions)

Учитывая тот факт, что разработанный алгоритм позволяет рассчитывать параметры режима в «будущем» времени, можно определить мгновенные значения синусоидальных составляющих токов, в том числе токов прямой, обратной и нулевой

последовательностей в любое время и определить их комплексные значения по мгновенным значениям. Мгновенные значения токов прямой и обратной последовательностей можно рассчитать с помощью фазных токов без нулевых составляющих как:

$$i_1(t) = \left[\left(i_A(\omega t) + i_B(\omega t + \frac{\pi}{2}) - i_C(\omega t + \frac{\pi}{2}) \right) / \sqrt{3} \right] / 2 \quad (8)$$

$$i_2(t) = \left[\left(i_A(\omega t) - i_B(\omega t + \frac{\pi}{2}) - i_C(\omega t + \frac{\pi}{2}) \right) / \sqrt{3} \right] / 2 \quad (8a)$$

Учитывая тот факт, достоинство предложенного алгоритма является использование всего четырех измерений мгновенных значений токов КЗ. При этом вычисляются мгновенные значения апериодической и синусоидальной периодической составляющих, амплитудные значения и аргументы токов КЗ, активные и реактивные мощности в элементах электрической сети в течении, по крайней мере, двух – трех периодов частоты электрической сети, когда затухание апериодической составляющей тока КЗ незначительно. Предложенный алгоритм позволяет создать быстродействующие защиты с временем идентификации КЗ в течении четверти периода частоты электрической сети. Можно создать алгоритмы всех защит, использующих токи и алгоритмы определения мест повреждений на линиях электропередачи. На точность определения мест КЗ современными ОМП существенное влияние оказывает наличие в токах КЗ апериодических составляющих. На точность выделения из токов КЗ синусоидальных составляющих предложенным алгоритмом не влияет насыщение магнитопроводов трансформаторов тока, по крайней мере, до 0,2 секунды.

Исключение апериодических составляющих из измеренных мгновенных значений токов КЗ позволяет повысить точность определения места КЗ на линии электропередачи. При двухстороннем определении места повреждения, в частном случае КЗ, можно воспользоваться уравнениями вычисления модуля напряжения на линии в прямой и обратной последовательности с двух сторон линии:

$$\left| \dot{U}_k \right| = ch(\gamma \cdot L \cdot k) \cdot \dot{U}_1 - Z_c \cdot sh(\gamma \cdot L \cdot k) \cdot \dot{I}_1 \quad (9)$$

$$\left| \dot{U}_n \right| = ch(\gamma \cdot L \cdot n) \cdot \dot{U}_2 - Z_c \cdot sh(\gamma \cdot L \cdot n) \cdot \dot{I}_2 \quad (10)$$

где $\left| \dot{U}_k \right|$ – модуль вычисляемого напряжения в точке линии, отстоящей на расстоянии k от начала линии, $\left| \dot{U}_n \right|$ – модуль вычисляемого напряжения в точке линии, отстоящей на расстоянии n от конца линии. Место короткого замыкания будет в точке, в которой вычисленные $\left| \dot{U}_k \right|$ и $\left| \dot{U}_n \right|$ будут равны.

На рисунке 5 иллюстрированы уравнения (8) и (8a). Однофазное КЗ находится на расстоянии 90 км от начала линии длиной 150 км. Прямые 1 и 2 соответствуют напряжениям прямой последовательности, 3 и 4 – напряжениям обратной последовательности.

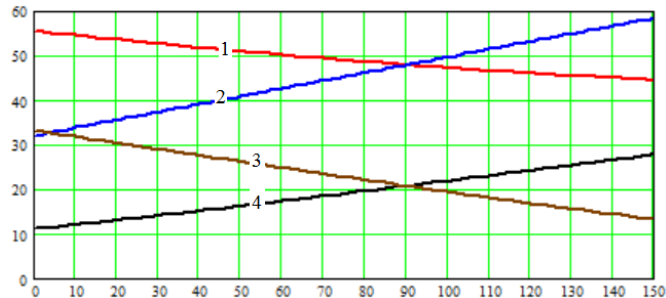


Рис. 5. Изменение рассчитанных напряжений согласно уравнениям (8) и (8a) при определении однофазного КЗ на расстоянии 90 км от начала линии длиной 150 км

Fig. 5. Variation of calculated voltages according to equations (9) and (9a) when determining a single-phase short-circuit at a distance of 90 km from the beginning of a 150 km long line

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При разрыве одной фазы сумма токов прямой, обратной и нулевой последовательностей равна нулю. На рисунке 6 приведены зависимости этой суммы при однофазном КЗ, сопровождаемом обрывом фазы.

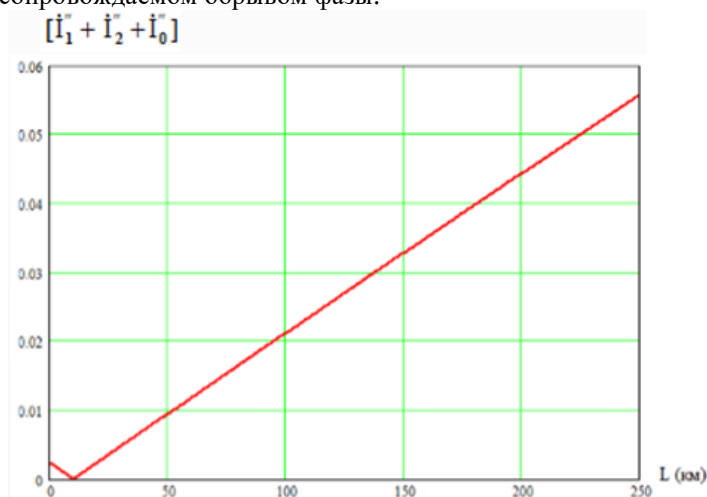


Рис. 6. Изменение величины суммы токов прямой, обратной и нулевой последовательностей при однофазном коротком замыкании, сопровождаемом обрывом фазы на расстоянии 10 км от начала линии. (длина линии 250 км)

Fig. 6. Variation of the sum of forward, reverse and zero-sequence currents in a single-phase short circuit accompanied by phase failure at a distance of 10 km from the beginning of the line. (line length 250 km)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Заключение (Conclusions)

1. Разработан алгоритм, позволяющий выбирать периодические составляющие токов короткого замыкания из токов, равных сумме периодической и аperiodической составляющих.
2. Алгоритм, использует всего четыре измерения мгновенных значений токов КЗ, разделенных интервалом дискретизации 0.625 мс, что позволяет не учитывать возможность насыщения магнитопроводов трансформаторов тока.
3. Алгоритм позволяет в любой момент, не охваченный сканированием («будущее» время), рассчитать токи прямой, обратной и нулевой последовательностей и любых их комбинаций, сопротивление, мощностей, используемых в релейной защите и аварийном управлении, измерив всего четыре величины мгновенных значений токов КЗ в пределах 2,0 - 2,5 мс.
4. Использование алгоритма повышает точность определения мест повреждений на линиях электропередачи.

Литература

1. Evans F.J., Wells G. Use of Sampling to Detect Transient Saturation in Protective Current Transformers // IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol. im-19, no 3, august 1970, pp. 144-147.
2. Haeg H., Forster M. Elektronischer Sammelschienenschutz // Brown Boveri Mitteilungen: Bd. 53, Nr 4/5/ 1965, pp. 326-339.
3. Iamandi A., et al. Distance Protection Scheme for a Digital Substation. In: 2020 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), Cluj-Napoca, Romania, 2020 pp. 1-6. doi: 10.1109/AQTR49680.2020.9129913.
4. Li L., Fan H. and Yu J. Data sharing and distribution security protection strategy for the electric power industry. In 2021 4th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE), Changsha, China, 2021 pp. 96-101. doi: 10.1109/AEMCSE51986.2021.00027
5. Ninghui H., Haibin X., et al. Sequence Coordination of Power Network Protection Based on Fault Current Limiting Equipment Action. In 2020 International Conference on Urban Engineering and Management Science (ICUEMS), Zhuhai, China, 2020 pp. 278-282. doi: 10.1109/ICUEMS50872.2020.00067
6. Shunxin L., et al., Power mechanism and strategy of digital transformation in power grid industry - Take State Grid Jibei Electric Power Company Limited as an example. In 2020 International Conference on

Computer Science and Management Technology (ICCSMT), Shanghai, China, 2020 pp. 340-345. doi: 10.1109/ICCSMT51754.2020.00077

7. Булычев А. В., Васильев Д. С., Козлов Б. Н., Силанов Д. Н. Релейная защита в распределительных сетях 110/35/10 кВ в условиях цифровой трансформации электроэнергетических систем // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 1(34). С. 71-77.

8. Бурянина Н.С., Васильева К.П., Королук Ю.Ф., Лесных Е.В., Суслов К.В. Определение места короткого замыкания на линиях электропередачи 110 кВ и выше по мгновенным значениям токов и напряжений // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017. № 3-4. С. 117 – 128.

9. Бурянина Н.С., Королук Ю.Ф., Лесных Е.В. Способ определения мгновенных значений параметров (токов и напряжений) прямой и обратной последовательностей. Патент РФ на изобретение № 2016137597. 21.03.2018. Бюл. № 09. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41033283>

10. Коновалова, Е.В. О работе дифференциально-фазных защит в ЕНЭС // Релейная защита и автоматизация. 2013. №02. С. 21.

11. Кужеков С.Л., Нудельман Г.С. v2009. № 4. С. 12-19.

12. Куликов, А. Л. Методы совершенствования дифференциальной релейной защиты / А. Л. Куликов, А. А. Колесников // Библиотека электротехника. – 2021. – № 2(266). – С. 1-96.

13. Лоскутов, А. Б., Куликов А. Л., Илюшин П. В. От плана ГОЭЛРО к цифровизации электроэнергетического комплекса страны // Электричество. 2020. № 12. С. 14-30.

14. Румянцев Ю. В., Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю., Новаш И. В. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 5. С. 397-417.

15. Царев, Н. В., Пинчуков П. С. Классификация цифровых устройств релейной защиты и автоматики // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2019. Т. 1. С. 49-54.

Авторы публикации

Бурянина Надежда Сергеевна – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение» Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова.

Лесных Елена Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика, электротехника, диагностика и управление в технических системах» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Лесных Алексей Станиславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика» Сибирского государственного университета водного транспорта.

Сулов Константин Витальевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета, профессор кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» Национального исследовательского университета «МЭИ».

Артемьева Майя Леонидовна – старший преподаватель кафедры «Общие дисциплины» Чукотского филиала Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова.

References

1. Evans F.J., Wells G. Use of Sampling to Detect Transient Saturation in Protective Current Transformers. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. 1970;19(3):144-3. doi: 10.1109/TIM.1970.4313884

2. Haeg H., Forster M. Elektronischer Sammelschienenenschutz. Brown Boveri Mitteilungen. 1965;53(5, Pt 4):326-13.

3. Iamandi A., et al. Distance Protection Scheme for a Digital Substation. 2020 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR); 2020; Cluj-Napoca, Romania. 2020. pp. 1-6. doi: 10.1109/AQTR49680.2020.9129913.

4. Li L., Fan H. and Yu J. Data sharing and distribution security protection strategy for the electric power industry. In 2021 4th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE); 2021; Changsha, China. 2021. pp. 96-101. doi: 10.1109/AEMCSE51986.2021.00027

5. Ninghui H., Haibin X., et al. Sequence Coordination of Power Network Protection Based on Fault Current Limiting Equipment Action. In 2020 International Conference on Urban Engineering and

Management Science (ICUEMS); 2020; Zhuhai, China. 2020. pp. 278-282. doi: 10.1109/ICUEMS50872.2020.00067

6. Shunxin L., et al., *Power mechanism and strategy of digital transformation in power grid industry - Take State Grid Jibei Electric Power Company Limited as an example*. In 2020 International Conference on Computer Science and Management Technology (ICCSMT); 2020; Shanghai, China. 2020 pp. 340-345. doi: 10.1109/ICCSMT51754.2020.00077

7. Bulychev A.V., Vasilev D.S., Kozlov V.N., et al. Relay protection in distribution networks 110/35/10 kV in the conditions of digital transformation of electric power systems. *Releynaya zashita i avtomatizatsiya*. 2019; 34(1):71-77. (In Russ).

8. Burjanina N.S., Vasil'eva K.P., Koroljuk J.F., Lesnykh E.V., Suslov K.V. DEFINITION OF THE PLACE OF SHORT CIRCUITS ON POWER LINES OF 110 KV AND ABOVE ON INSTANTANEOUS VALUES OF CURRENTS AND VOLTAGES. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(3-4):107-118. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-3-4-107-118>

9. Buryanina NS, Korolyuk YuF, Lesnykh EV. Sposob opredeleniya mgnovennykh znacheniy parametrov (tokov i napryazheniy) pryamoy i obratnoy posledovatel'nostey. Patent RUS №2016137597. 03.11.2018. Byul. №09. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41033283>. (In Russ).

10. Konovalova, E.V. O rabote differentsialno-faznykh zashchit v ENES. *Releynaya zashita i avtomatizatsiya*. 2013; 02:21. (In Russ).

11. Kuzhekov S.L., Nudelman G.S. Obespecheniye pravilnoy raboty mikroprotsessornykh ustroystv differentsialnoy zashchity pri nasyshchenii transformatorov toka. *Izvestiya VUZov «Elektromekhanika»*. 2009; 4:12-19. (In Russ).

12. Kulikov, A. L., Kolesnikov A.A. Method of improvement for differential relay. *Bibliotekhnaya elektrotekhnika*. 2021; 266(2):1-96. (In Russ).

13. Loskutov A. B., Kulikov A. L., Ilyushin P. V. From the GOELRO plan to digitalization of russia's electric power complex. *Electrichestvo*. 2020; 12:14-30. (In Russ). doi: 10.24160/0013-5380

14. Rumiantsev Yu.V., Romaniuk F.A., Rumiantsev V.Yu., Novash I.V. DIGITAL FILTERS IMPLEMENTATION IN MICROPROCESSOR-BASED RELAY PROTECTION. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2016;59(5):397-417. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417>

15. Tsarev, N.V., Pinchukov P.S. Klassifikatsiya tsifrovyykh ustroystv releynoy zashchity i avtomatiki // Nauchno-tekhnicheskoye i ekonomicheskoye sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke. 2019; 1:49-54. (In Russ).

Authors of the publication

Nadejda S. Buryanina – North Eastern Federal University, Yakutsk, Russia.

Elena V. Lesnykh – Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Aleksey S. Lesnykh – Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

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

Maya L. Artemyeva – Chukotka branch of North Eastern Federal University, Anadyr, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено

20.11.2023 г.

Отредактировано

09.01.2024 г.

Принято

01.02.2024 г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 629.113.6

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-2-105-113

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ УЧЕБНОГО СТЕНДА «МОТОР ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ» ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Сафин А.Р., Шакурова З.М., Доломанюк Л.В., Гаврилов В.А., Денисова Н.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
sarkazan@bk.ru

Резюме: В современном мире остро стоит проблема экологического состояния нашей планеты. Экологическая обстановка зависит от множества факторов, к ним можно отнести как природные явления, так и действия человека. Одним из решений данной проблемы является замена традиционных автомобилей с ДВС на более экологичные электромобили. **ЦЕЛЬ.** Задачей данного исследования является анализ внутреннего устройства электромобиля, на основе учебного стенда «Мотор электромобиля», а также исследование функций данного устройства, располагающегося на базе Казанского государственного энергетического университета. **МЕТОДЫ.** Авторами статьи проведена обработка и анализ возможностей современного лабораторного оборудования, имитирующего работу того или иного узла электромобиля. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Технология лабораторного стенда осуществляющего работу электротранспорта, в сумме с программным обеспечением DVT Customer позволяет реализовать полное управление электродвигателем, а также производить мониторинг и изменение большого количества параметров, влияющих на работу всего устройства в целом. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Так как электромобили с каждым годом набирают все большую популярность, то существенно растет и спрос на людей способных диагностировать, ремонтировать, а также улучшать уже существующие и разрабатывать новые узлы и агрегаты в области электромобилестроения. Использование стенда «Мотор электромобиля» для обучения техническим предметам и проведения научно-исследовательских работ, может послужить хорошей основой для формирования общей базы знаний об электротранспорте, его устройстве, принципе работы всех основных элементов, мониторинге и диагностике электромобиля.

Ключевые слова: электротранспорт; учебный стенд; электродвигатель, блок управления; тренажер.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00099, <https://rscf.ru/project/24-29-00099/>

Для цитирования: Сафин А.Р., Шакурова З.М., Доломанюк Л.В., Гаврилов В.А., Денисова Н.В. Особенности работы учебного стенда «Мотор электромобиля» при определении характеристик работы электротранспорта // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 105-113. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-105-113.

FEATURES OF THE OPERATION OF THE TRAINING STAND “ELECTRIC VEHICLE MOTOR” IN DETERMINING THE OPERATION CHARACTERISTICS OF ELECTRIC TRANSPORT

Safin A.R., Shakurova Z.M., Dolomanyuk L.V., Gavrilov V.A., Denisova N.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
sarkazan@bk.ru

Abstract: In the modern world, the problem of the ecological state of our planet is acute. The environmental situation depends on many factors, these include both natural phenomena and human actions. One solution to this problem is to replace traditional internal combustion

engines with more environmentally friendly electric vehicles. **THE PURPOSE.** The objective of this study is to analyze the internal structure of an electric vehicle, based on the training stand “Electric Vehicle Motor”, as well as to study the functions of this device, located at the Kazan State Energy University. **METHODS.** The authors of the article processed and analyzed the capabilities of modern laboratory equipment that simulates the operation of a particular component of an electric vehicle. **RESULTS.** The technology of the laboratory bench operating the electric vehicle, together with the DVT Customer software, allows for full control of the electric motor, as well as monitoring and changing a large number of parameters that affect the operation of the entire device as a whole. **CONCLUSION.** Since electric vehicles are gaining more and more popularity every year, the demand for people capable of diagnosing, repairing, and even improving existing ones and developing new components and assemblies in the field of electric vehicles is growing significantly. Using the “Electric Vehicle Motor” stand for teaching technical subjects and conducting research work can serve as a good basis for the formation of a general knowledge base about electric transport, its structure, the operating principle of all the main elements, monitoring and diagnostics of an electric vehicle.

Keywords: electric transport; training stand; electric motor, control unit; training apparatus.

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-29-00099, <https://rscf.ru/en/project/24-29-00099/>

For citation: Safin A.R., Shakurova Z.M., Dolomanyuk L.V., Gavrilov V.A., Denisova N.V. Features of the operation of the training stand “Electric vehicle motor” in determining the operation characteristics of electric transport. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (2): 105-113. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-105-113.

Введение (Introduction)

Для определения характеристик работы электромобиля необходим испытательный стенд, и в статье представлен стенд «Мотор электромобиля», и для определения научной и практической новизны необходимо его сравнить с другими типами стендов.

В статье [1] представлены основные этапы разработки устройства, позволяющего имитировать движение электромобиля. Основной задачей данного стенда является создание имитации движения транспортного средства с приводом от электродвигателя. Оборудование обеспечивает имитацию реальных нагрузок на тяговый электродвигатель при различных дорожных условиях. В состав устройства входят: нагружающее устройство, которым является нагружающий генератор, имитирующий несколько видов сопротивлений, испытываемых транспортным средством; инерционный аккумулятор, создающий нагрузку на электродвигатель; автоматическая система управления нагружающим генератором. Отличительной особенностью данного устройства от представленного далее стенда «Мотор электромобиля» заключается в использовании разных устройств, имитирующих нагрузку транспортного средства. В первом объекте имитация нагрузки достигается с помощью нагружающего генератора, в свою очередь, во втором устройстве имитация реализуется порошковым тормозом, отвечающим за испытываемую электродвигателем нагрузку.

В статье [2] обсуждается интерактивный стенд, предназначенный для изучения компонентов электромобиля, а также область его применения. С его помощью можно узнать принцип работы, диагностики и ремонта таких компонентов, как: бесщеточные двигатели постоянного тока, синхронные двигатели с постоянными магнитами, литий-ионные батареи, зарядные устройства постоянного тока. Компоненты, представленные на стенде, соответствуют реальным агрегатам, используемым в современных электромобилях и гибридных транспортных средствах. Данное устройство можно использовать в процессе обучения таких дисциплин как строительство транспортных средств и диагностика транспортных средств с ориентацией на гибридные или полностью электрические транспортные средства. Резюмируя, можно сказать, что представленный в данной работе стенд имеет аналогичные особенности, что и стенд «Мотор электромобиля», однако между ними существует одна функциональная разница, которая заключается в отсутствии возможности отслеживания, сбора, обработки и изменения получаемых данных, характеризующих работу электродвигателя и всего стенда в целом.

В статье [3] рассматриваются различные методы диагностики неисправностей основных компонентов электромобилей. В одном из разделов представлена диагностика электрического двигателя. Неисправности электродвигателя разделяют на две группы: электрические и механические. Основными инструментами для диагностики неисправностей в асинхронном электродвигателе, являются тепловой анализ, анализ вибрации и анализ тока электродвигателя. Для анализа сигнатур тока используются

технологии, на основе цифрового сигнального процессора Преимущество анализа тока двигателя по сравнению с другими методами заключается в экономичности. Таким образом, опираясь на вышеизложенную информацию, можно прийти к заключению, что встроенные в стенд блок управления вместе со специальным программным обеспечением DVT Customer позволяет осуществить сбор и отслеживание данных, необходимых для диагностики неисправностей электродвигателя.

В работе [4] рассматривается специфика движения электромобиля в загородном цикле при различных условиях эксплуатации, также представлены зависимости потребляемой мощности электродвигателем от внешних факторов. В результате проведенных исследований авторами был сделан следующий вывод: главными факторами, влияющими на потребляемую мощность электродвигателем, являются скорость движения электромобиля и угол дорожного полотна. Исходя из этой информации можно сказать, что представленный далее стенд дает возможность на практике убедиться в вышеперечисленных гипотезах. Данная возможность реализуется путем изменения основных параметров электродвигателя и тормозной системы. На основании рассмотренной литературы можно сделать вывод, что стенд «Мотор электромобиля» является многофункциональным устройством.

В статье [5] уже рассматривается разработка и создание стенда для проверки работы синхронного двигателя, где для измерения вращающего момента и частоты вращения используются тензорезисторы, без проверки электрических параметров. Однако, нагрузка на валу создается случайным образом и не моделирует работу трансмиссии и колес, что не дает возможность исследовать режимы работы электромобиля, а только электрического двигателя.

В работе [6] уже описывается стенд для испытаний двигателя гоночного электромобиля, который позволяет исследовать работу трансмиссии, колес и шин, термический анализ и т.д., однако нет блока вспомогательных устройств, который характерен для обычного электротранспорта, т.е. не учитывается питание на собственные нужды. Также система питания выполнена максимально просто, без блока управления и подзарядки.

В исследованиях [7-9] решаются некоторые проблемы, которые существуют у стендов для испытаний электромобилей, однако полного и качественного решения на сегодняшний день пока не существует, таким образом существует необходимость в таком стенде.

Цель исследования заключается в определении возможностей стенда «Мотор электромобиля», его устройства и данных, которые позволят перейти к комплексному анализу параметров работы электромобиля. Научная значимость состоит в исследовании режимов эксплуатации электротранспорта, с автоматическим режимом построения графиков изменений характеристик. Практическая значимость исследования заключается в том, что стенд подходит как для ознакомления с внутренним устройством и принципом действия электромобиля, так и для проведения практических работ, связанных с диагностикой и настройкой основных параметров электродвигателя.

Материалы и методы (Materials and methods)

Современная схема электрической силовой передачи электромобиля представлена на рисунке 1. В ее состав входят три основные подсистемы: двигательная установка, источник энергии и вспомогательные устройства [10-14].



Рис.1. Принципиальная схема электромобиля

Fig. 1. Schematic diagram of an electric car

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

Учебный стенд «Мотор электромобиля» изображен на рисунке 2. Данный тренажер позволяет наглядно продемонстрировать основные элементы электромобиля. В его состав входят не только узлы и агрегаты, отличающие электромобиль от традиционного автомобиля с двигателем внутреннего сгорания, но и другие устройства, и электроприемники, входящие в состав любой автомашины. К ним можно отнести указатели поворота, механизм стеклоподъемника, динамики, фары, задний комбинированный фонарь и т. д.



Рис.2. Стенд «Мотор электромобиля»

Fig. 2. Stand "Electric Vehicle Motor"

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

Несмотря на множество интегрированных устройств, основными являются [15-19]:

1. Литий-ионная полимерная батарея. Данное устройство предназначено для хранения и передачи электрической энергии в форме постоянного тока. При получении сигнала от блока управления батарея подает на преобразователь электрическую энергию постоянного тока, используемую для вращения двигателя.

2. Преобразователь. Основная функция этого элемента заключается в преобразовании постоянного тока батареи в переменный ток, необходимый для работы электродвигателя. Кроме того, преобразователь может работать и в обратном направлении, преобразуя переменный ток рекуперативного торможения в постоянный ток, используемый для подзарядки батареи.

3. Блок управления двигателем. Является связующим звеном между источником электрической энергии и главным ее потребителем, которым выступает электродвигатель. Главной задачей блока управления является регулирование поступающей от батареи и преобразователя электроэнергии для ее последующего распределения к электродвигателю.

4. Трехфазный асинхронный электродвигатель с номинальной мощностью 7 кВт, линейным напряжением 45 В. Данное устройство преобразует электрическую энергию, подаваемую от батареи блоком управления, в механическую энергию движения трансмиссии и вращения приводных колес. Установленный на данном стенде электродвигатель отвечает не только за движение автомобиля, но и за рекуперацию электрической энергии.

5. Зарядное устройство. Предназначением этого агрегата является зарядка батарей от внешних источников питания, путем преобразования переменного тока в постоянный.

6. Трансмиссия. Служит для передачи механической мощности тягового электродвигателя на приводные колеса.

7. Преобразователи постоянного тока. Этот вид устройств относится к элементам электромобиля, преобразующим постоянный ток высокого напряжения батареи в постоянный ток низкого напряжения, необходимый для различных устройств автомобиля

Принцип действия стенда аналогичен работе электромобиля. При нажатии на педаль акселератора блок управления двигателем начинает отбор и регулирование электрической энергии от батарей и преобразователей. После настройки блока управления преобразователь подает определенное количество электрической энергии на двигатель (исходя из степени нажатия на педаль). Электродвигатель преобразует электрическую энергию в механическую (вращение). Вращение ротора двигателя передается через трансмиссию на колеса, и автомобиль начинает движение.

Кроме как визуальной демонстрации внутреннего устройства электромобиля, стенд «Мотор электромобиля» позволяет осуществить управление рядом функций транспортного средства. К основным возможностям устройства можно отнести: управление двигателем

электромобиля, регулировка разгона и замедления автомобиля, контроль скорости рекуперативного торможения, настройка датчика ускорения, изменение кривой крутящего момента двигателя, регулировка входного напряжения батареи, изменение максимальной скорости движения, запись электрических данных во время вождения. Большинство из приведенных опций позволяют отслеживать и изменять рабочие характеристики устройства.

Рассмотрим конкретнее некоторые из функций. Управление двигателем электромобиля осуществляется путем взаимодействия педали акселератора с блоком управления двигателем. При нажатии на педаль акселератора на блок поступает управляющий сигнал. В зависимости от настройки педали устройство определяет какой необходимо осуществить перепад частоты или напряжения, подаваемого на двигатель. Данная функция позволяет смоделировать управление транспортным средством, осуществить разгон, либо замедление автомобиля, не прибегая к системе торможения.

Для реализации остальных возможностей стенда необходимо воспользоваться специальным программным обеспечением DTV Customer. Данное ПО устанавливается непосредственно на персональный компьютер, с которого в последующем и будет осуществляться контроль за всеми основными устройствами стенда. Для осуществления работы с программным обеспечением необходим переходник USB-CAN, позволяющий настраивать компьютер и подключать его к стенду по CAN-шине.

Совместное взаимодействие блока управления и программного обеспечения позволяет отслеживать и регулировать такие параметры, как частоту вращения двигателя, текущий переменный ток электродвигателя, модуль напряжения и напряжение дроссельной заслонки, которое отвечает за открытия или закрытия дросселя. Изменение упомянутых характеристик во времени можно наблюдать на рисунке 3.

К основным характеристикам автомобиля относятся максимальная эксплуатационная скорость, преодолеваемый подъем и время набора скорости [15]. Максимальную скорость автомобиля можно определить по максимальной частоте вращения ротора электродвигателя. К данному выводу можно прийти исходя из следующей формулы:

$$V_{max} = \frac{\pi N_{t\ max} r_d}{30 i_{g\ min} i_o} \text{ (м/с)},$$

где $N_{t\ max}$ - максимальная частота вращения электродвигателя, $i_{g\ min}$ – минимальное передаточное число трансмиссии, i_o - передаточное число бортовой передачи, r_d – радиус приводных колес.

Обсуждение результатов (Discussing the results)

Результаты изменения максимальной частоты двигателя изображены в виде двух кривых, изображенных на рисунке 4. Результаты измерений снимались при неизменном крутящем моменте. Исходя из показаний графика и ранее представленной формулы можно сказать, что при максимальной частоте вращения двигателя равной 5000 об/мин, автомобиль развивает большую максимальную скорость, чем при частоте вращения равной 3000 об/мин. На основании вышесказанного можно утверждать, что чем быстрее двигатель наберет максимальное количество оборотов, тем быстрее он разовьет скорость, до своего максимального значения.

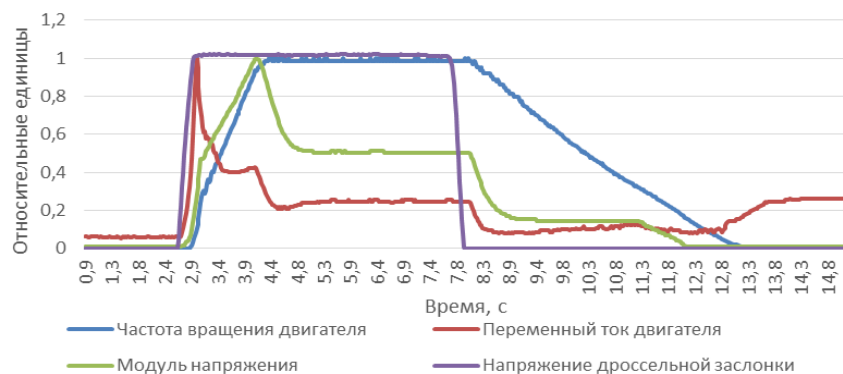


Рис. 3. Изменение основных параметров во времени

Fig. 3. Changes in basic parameters over time

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

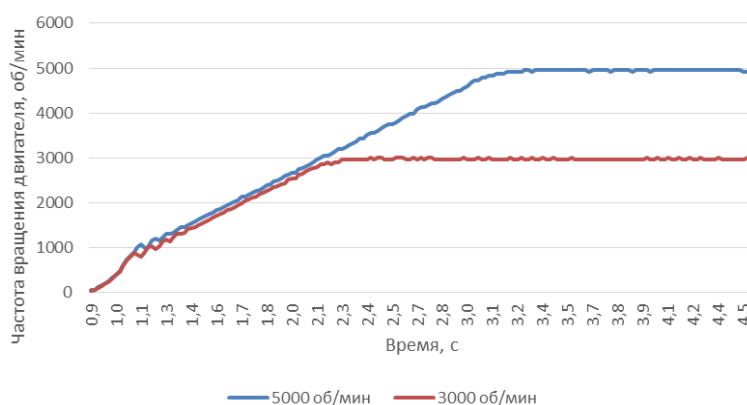


Рис. 4. Изменение частоты вращения двигателя

Fig. 4. Changing engine speed

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

На рисунке 5 отображена зависимость скорости вращения электродвигателя от вырабатываемого крутящего момента. Все три измерения были проведены при неизменной нагрузке. Ее суть заключалась в имитации нагрузки, приложенной при движении автомобиля. Все графики показывают изменение скорости вращения двигателя, от начала движения, до достижения максимальной частоты вращения ротора. Рассматривая кривые, можно сделать вывод, что момент, вырабатываемый двигателем, влияет на ускорение вращения ротора, данную зависимость можно наблюдать на графиках, характеризующих 100%, 50% и 35% момент.

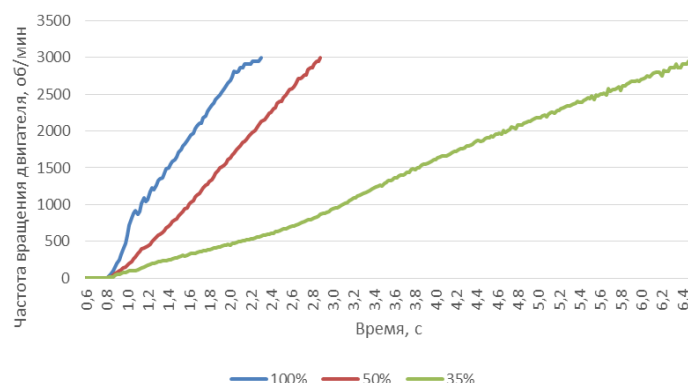


Рис. 5. Изменение скорости вращения двигателя в зависимости от вырабатываемого момента

Fig. 5. Changing the engine rotation speed depending on the torque produced

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

Заклучение (Conclusions)

Резюмируя, можно утверждать, что стенд «Мотор электромобиля» позволяет наглядно продемонстрировать все основное оборудование, которое включает в себя любой электромобиль. Также данный тренажер знакомит пользователя с функциональными возможностями тех или иных агрегатов, к ним можно отнести двигательную установку, источник энергии и вспомогательные устройства. Стоит отметить, что в совокупности с программным обеспечением DVT Customer испытательный стенд предоставляет возможность не только осуществлять управление электродвигателем, но и производить запись и настройку всех основных параметров данного устройства, изменяя напряжение, ток, крутящий момент, частоту оборотов ротора и многое другое.

Также стенд «Мотор электромобиля» может быть использован в практико-ориентированных целях. Применение данного устройства в высших учебных заведениях может послужить отличной основой для ознакомления студентов со всеми протекающими процессами, возникающими в результате эксплуатации электромобиля и электродвигателя, в частности.

Литература

1. Yin H., Wang Z., Liu P., Zhang Z. and Li Y. Voltage Fault Diagnosis of Power Batteries based

- on Boxplots and Gini Impurity for Electric Vehicles // 2019 Electric Vehicles International Conference (EV), Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/EV.2019.8892849.
2. Malek, A., & Łusiak, T. Interactive test stand for electric vehicle components // AUTOBUSY – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe. 20(1-2), 93–98. <https://doi.org/10.24136/atest.2019.014>
3. Fei Lin, Chau K. T., Chan C. C., Chunhua Liu, Fault Diagnosis of Power Components in Electric Vehicles // Journal of Asian Electric Vehicles, 2013, Volume 11, Issue 2, Pages 1659-1666, <https://doi.org/10.4130/jaev.11.1659>
4. Вахрушев М. А., Беляев Д. С., Генсон Е.М. Теоретическое исследование зависимости потребления электроэнергии электромобилем от внешних факторов // ТТПС. 2022. №4 (62), с. 31-35.
5. Петров, Т.И., Сафин А.Р. Разработка и реализация стенда для подтверждения эффективности топологической оптимизации ротора синхронных двигателей с постоянными магнитами // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13, № 2(50). – С. 100-108. – EDN YRAJUO.
6. Dusik Maja & Franasz, J & Mierzwa, P & Wylenzek, D. Stand for testing the electrical race car engine // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 95. 012087. DOI 10.1088/1757-899X/95/1/012087.
7. Sanguesa J. A., Torres-Sanz V., Garrido P., Martinez F. J., Marquez-Barja J. M. A. Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges // Smart Cities, vol. 4, pp. 372-404, 2021.
8. Gracheva E.I. Algorithms and Models of Power Losses in Circuit Breakers of Shop Networks of Industrial Enterprises // Proceedings - 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 202, Lipetsk, 1212-1216 (2021) doi:10.1109/SUMMA53307.2021.9632094
9. Сафин А.Р, Цветков А.Н., Петров Т.И., Басенко В.Р., Ившина П.В. Разработка макета мобильной установки заряда электротранспорта и стенда для проведения испытаний // Естественные и технические науки. – 2023. – № 7(182). – С. 138-145. – DOI 10.25633/ETN.2023.07.09. – EDN NZWEGG.
10. Prejbeanu R. Self-Scanning System and Evaluation of Dynamic Electrical Performance of Electric Vehicles Using Different Control Systems // 2023 24th International Carpathian Control Conference (ICCC), Miskolc-Szilvásvárad, Hungary, 2023, pp. 370-375, doi: 10.1109/ICCC57093.2023.10178924
11. Сафин А.Р, Ившин И.В., Цветков А.Н., Петров Т.И., Басенко В.Р., Манахов В.А. Развитие технологии мобильных зарядных станций для электромобилей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 5. С. 100-114. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-3-100-114.
12. Aguiari D., Chou K. S., Tse R., Pau G. Monitoring Electric Vehicles on The Go // 2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, 2022, pp. 885-888, doi: 10.1109/CCNC49033.2022.9700713.
13. Цветков А.Н., Корнилов В.Ю., Сафин А.Р., Логачева А.Г., Петров Т.И., Кувшинов Н.Е. Управляющая измерительно-информационная система экспериментального стенда // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 88-98. – DOI 10.30724/1998-9903-2020-22-4-88-98. – EDN FDPZYE.
14. Cai Y., Lu L., Shen P., Feng X., Wang H., Ouyang M. Online Weld Breakage Diagnosis for the Battery of Electric Vehicle: A Data-Driven Approach // 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), pp. 1-5, 2016.
15. Devisree S., Jisha Kuruvilla P. Modelling and simulation of SVPWM inverter fed permanent magnet brushless DC motor drive // Int. J. Adv. Res. Elec. Electron. Instr. Eng., vol. 2, pp. 1957-1955. May 2013.
16. Parvathi A., Venkataramana G. Speed control of induction motor using VSI based on PWM/ SVPWM techniques // Int. J. Adv. Res. and Innovative Ideas in Education, vol. 5, no. 4, 2019.
17. Петров, Т. И. Модификация генетического алгоритма для комплексной топологической оптимизации ротора синхронных двигателей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 70-79. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-3-70-79. – EDN SJZIBT.
18. Гибадуллин Р.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Цветков А.Н., Владимиров О.В., Шакурова З.М. Стенд для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(1):164-175. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-164-175>
19. Nemirovskiy A. Experimental study of the relationship between the technical state of a power transformer and the parameters of the higher harmonic components of currents and voltages generated by

it // Sustainable Energy Systems: innovative perspectives: Conference proceedings, Saint-Petersburg, 155-166 (2021) doi:10.1007/978-3-030- 67654-4_18

Авторы публикации

Сафин Альфред Робертович - д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Шакурова Зумейра Мунировна – канд. пед. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Доломанюк Леонид Владимирович – канд. пед. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Гаврилов Вадим Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Денисова Наталья Вячеславовна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Yin H., Wang Z., Liu P., Zhang Z. and Li Y. Voltage Fault Diagnosis of Power Batteries based on Boxplots and Gini Impurity for Electric Vehicles. *2019 Electric Vehicles International Conference (EV), Bucharest, Romania*. 2019;1-5.
2. Małek, A., & Łusiak, T. Interactive test stand for electric vehicle components. *AUTOBUSY – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*. 2019;20(1-2):93–98.
3. Fei Lin, Chau K. T., Chan C. C., Chunhua Liu, Fault Diagnosis of Power Components in Electric Vehicles. *Journal of Asian Electric Vehicles*. 2013;11(2):1659-1666.
4. Vakhrushev M. A., Belyaev D. S., Genson E. M. Theoretical study of the dependence of electricity consumption by an electric vehicle on external factors. *TTPS*. 2022; 4(62):31-35.
5. Petrov, T.I., Safin A.R. Development and implementation of a stand to confirm the effectiveness of topological optimization of the rotor of synchronous motors with permanent magnets. *Bulletin of the Kazan State Energy University*. 2021; 13,2(50):100-108.
6. Dusik Maja & Franiasz, J & Mierzwa, P & Wylenzek, D. Stand for testing the electrical race car engine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015;95:012087.
7. Sanguesa J. A., Torres-Sanz V., Garrido P., Martinez F. J., Marquez-Barja J. M. A. Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities*. 2021;4:372-404.
8. Gracheva E.I. Algorithms and Models of Power Losses in Circuit Breakers of Shop Networks of Industrial Enterprises. *Proceedings - 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021, Lipetsk*. 2021;1212-1216.
9. Safin A.R., Tsvetkov A.N., Petrov T.I., Basenko V.R., Ivshina P.V. Development of a model of a mobile electric vehicle charging installation and a test stand. *Natural and technical sciences*. 2023; 7(182):138-145.
10. Prejbeanu R. Self-Scanning System and Evaluation of Dynamic Electrical Performance of Electric Vehicles Using Different Control Systems. *2023 24th International Carpathian Control Conference (ICCC), Miskolc-Szilvásvárad, Hungary*. 2023; 370-375.
11. Safin A.R., Ivshin I.V., Tsvetkov A.N., Petrov T.I., Basenko V.R., Manakhov V.A. Development of the technology of mobile charging stations for electric vehicles. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2021; 23(5):100-114.
12. Aguiari D., Chou K. S., Tse R., Pau G. Monitoring Electric Vehicles on The Go. *2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA*. 2022; 885-888.
13. Tsvetkov A.N., Kornilov V.Yu., Safin A.R., Logacheva A.G., Petrov T.I., Kuvshinov N.E. Control measuring and information system of an experimental stand. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2020;22(4):88-98.
14. Cai Y., Lu L., Shen P., Feng X., Wang H., Ouyang M. Online Weld Breakage Diagnosis for the Battery of Electric Vehicle: A Data-Driven Approach. *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion*

Conference (VPPC). 2016; 1-5.

15. Devisree S., Jisha Kuruvilla P. Modelling and simulation of SVPWM inverter fed permanent magnet brushless DC motor drive. *Int. J. Adv. Res. Elec. Electron. Instr. Eng.* 2013; 2; 1957-1955.

16. Parvathi A., Venkataramana G. Speed control of induction motor using VSI based on PWM/SVPWM techniques. *Int. J. Adv. Res. and Innovative Ideas in Education*, vol. 5, no. 4, 2019.

17. Petrov, T. I. Modification of a genetic algorithm for complex topological optimization of the rotor of synchronous motors. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS.* 2021;23(3):70-79.

18. Gibadullin R.R., Nizamiev M.F., Ivshin I.V., Tsvetkov A.N., Vladimirov O.V., Shakurova Z.M. Stand for studying the performance and quality of functioning of electrical complexes and electric drive systems with frequency regulators. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS.* 2022;24(1):164-175.

19. Nemirovskiy A. Experimental study of the relationship between the technical state of a power transformer and the parameters of the higher harmonic components of currents and voltages generated by it. *Sustainable Energy Systems: innovative perspectives: Conference proceedings, Saint-Petersburg.* 2021; 155-166.

Authors of the publication

Alfred R. Safin - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Zumeira M. Shakurova - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Leonid V. Dolomanyuk - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Vadim A. Gavrilov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Natalia V. Denisova - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **04.02.2024 г.**

Отредактировано **09.02.2024 г.**

Принято **11.02.2024 г.**



ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ С ПРОИЗВОДСТВОМ ВОДОРОДА, КИСЛОРОДА, ТЕПЛА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Николаев Ю.Е., Айдаров М.А.

«Саратовский государственный технический университет» имени Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Россия
maksim.aydarov@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ* исследования. Мировая тенденция декарбонизации национальных экономик ведущих стран мира предполагает увеличение производства энергоносителей за счет возобновляемых источников энергии и водорода. Наиболее экологичным способом производства водорода является электролиз воды, использующий энергию ветра и солнца. Комбинированное производство тепловой, электрической энергии, водорода и кислорода, осуществляемое энергокомплексами, обеспечивает сокращение вредных выбросов и повышение их экономической эффективности. **ЦЕЛЬ.** Разработать методические положения по определению показателей эффективности гибридных энергокомплексов с производством водорода. Произвести оценку влияния величины установленной мощности фотоэлектрических преобразователей и стоимости отпускаемого водорода на технико-экономические показатели энергокомплекса. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной задачи применялся метод расчетного эксперимента, учитывающий географо-климатические данные места расположения энергокомплекса, а также характер потребления тепловой, электрической энергии и водорода. Расчет был реализован на языке Visual Basic. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье описана актуальность темы, рассмотрено влияние величины установленной мощности фотоэлектрических преобразователей, географо-климатических и стоимостных характеристик на показатели эффективности энергокомплекса. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Определена структура и предложена принципиальная схема многоцелевого энергокомплекса. Разработана методика расчета количественных и экономических показателей установки. В ходе исследования отмечено, что существует оптимальная величина установленной мощности фотоэлектрической установки, дальнейшее увеличение которой нецелесообразно с экономической точки зрения. Также было определено, что комбинирование водородных заправок на базе солнечных установок с традиционными источниками энергоснабжения позволяет снизить стоимость производимого водорода, что в будущем может стать решением проблемы создания водородной инфраструктуры.

Ключевые слова: водородная заправка; газопоршневая мини-тэц; электролиз; водород.

Для цитирования: Николаев Ю.Е., Айдаров М.А. Оценка эффективности энергокомплексов с производством водорода, кислорода, тепла и электроэнергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 114-127. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-114-127.

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF ENERGY COMPLEXES WITH THE PRODUCTION OF HYDROGEN, OXYGEN, HEAT AND ELECTRICITY

Nikolaev Y.E., Aidarov M.A.

Gagarin Y.A. Saratov State Technical University, Saratov, Russian Federation
maksim.aydarov@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE* of the research. The global trend of decarbonization of the national economies of the leading countries of the world implies an increase in energy production due to renewable energy sources and hydrogen. The most environmentally friendly way to produce hydrogen is the electrolysis of water using wind and solar energy. Combined production of thermal, electric energy, hydrogen and oxygen carried out by energy complexes ensures reduction

of harmful emissions and increase of their economic efficiency. **METHODS.** In solving this problem, the method of computational experiment was used, taking into account the geographical and climatic data of the location of the energy complex, as well as the nature of consumption of thermal, electric energy and hydrogen. The calculation was implemented in Visual Basic. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, examines the influence of the installed capacity of photovoltaic converters, geographical, climatic and cost characteristics on the efficiency of the energy complex. **CONCLUSION.** The structure is determined and a schematic diagram of a multi-purpose energy complex is proposed. A methodology for calculating quantitative and economic indicators of the installation has been developed. In the course of the study, it was noted that there is an optimal value of the installed capacity of a photovoltaic installation, further increase of which is inexpedient from an economic point of view. It was also determined that the combination of hydrogen gas stations based on solar installations with traditional sources of energy supply can reduce the cost of hydrogen produced, which in the future may be a solution to the problem of creating a hydrogen infrastructure.

Keywords: hydrogen fueling station; gas engine mini-chp; electrolysis; hydrogen

For citation: Nikolaev Y.E., Aidarov M.A. Evaluation of the efficiency of energy complexes with the production of hydrogen, oxygen, heat and electricity. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (2): 114-127. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-114-127.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

Сокращение запасов органического топлива в мире и требование декарбонизации национального хозяйства вынуждает развитые страны все в большей мере искать экологически чистые источники энергии. К таким источникам энергии относится водород. Использование водорода наиболее эффективно в топливных элементах (ТЭ), обеспечивающих выработку электрической энергии с КПД до 70% [1]. Применение водорода в качестве основного энергоносителя приведет к созданию принципиально новой водородной экономики. Потребителями водорода являются крупные предприятия нефтехимии, металлургии, в перспективе сюда можно отнести энергетику и транспорт.

С начала XXI века развитые и развивающиеся страны Западной Европы, Азии, а также США активно экспериментируют с использованием водорода для нужд транспорта [2]. Крупные автопроизводители, такие как General Motors, BMW, Honda, Hyundai, Toyota, Volkswagen и другие разработали и протестировали прототипы автомобилей, работающих на водородных топливных элементах [3].

В России также проводятся исследования и разработка автомобилей на основе топливных элементов. Так первые попытки перевода автомобилей на топливные элементы начались еще в начале 2000-х годов. Тогда на заводе АвтоВАЗ были разработаны водородные электромобили Антэл-1 и Антэл-2, однако их серийное производство организовать не удалось. Сегодня же на базе ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» ведется разработка водородных автомобилей класса «люкс» AURUS HYDROGEN [4]. Помимо этого, концерн КАМАЗ работает над проектом водородного автобуса КАМАЗ-6290, который позволит организовать междугородные перевозки [5].

Транспортные средства на основе топливных элементов имеют несколько преимуществ, которые могут сделать их важной частью транспортного сектора в ближайшем будущем [6]:

- Отсутствие выбросов вредных веществ в атмосферу в процессе эксплуатации;
- Более высокая эффективность в сравнении с традиционными двигателями внутреннего сгорания;
- Малый расход топлива;
- Более быстрая заправка, по сравнению с электромобилями на аккумуляторных батареях.

Однако, невзирая на все преимущества, у технологии ТЭ имеется ряд значительных препятствий, которые мешают массовому переходу автомобильной отрасли на эту технологию. Среди них:

- Высокая стоимость получения водорода, не позволяющая ему конкурировать с дешевым ископаемым топливом;
- Сам процесс получения водорода, который сопровождается значительными технологическими сложностями;

– Невозможность массового внедрения водородных автомобилей и других крупных потребителей водорода, ввиду отсутствия систем хранения, производства, накопления и распределения водорода;

– Конструкция современных топливных элементов, используемых в транспорте, накладывает значительное ограничение по уровню чистоты потребляемого водорода, что приводит к его значительному удорожанию.

Так получение водорода из ископаемого топлива, например, методом паровой конверсии метана, с экономической точки зрения является наиболее оправданным, ввиду низкой стоимости конечного продукта [7]. Однако, из-за высокой эмиссии диоксида углерода и низкого уровня чистоты получаемого водорода в дальнейшей перспективе при увеличении доли водородного транспорта использовать водород, полученный из ископаемого топлива станет невозможно. Поэтому в будущем будет расти доля водорода, производимого методом электролиза. Так, электролизный метод производства водорода может быть использован при применении внепиковой электроэнергии атомных электростанций или выработке электроэнергии на возобновляемых источниках энергии [8].

При проведении литературного обзора в области водородных технологий и возобновляемых источников энергии наблюдается тенденция увеличения количества публикаций по данной тематике, как отечественных, так и зарубежных, что свидетельствует об актуальности вопросов, связанных с данной отраслью. Так, в статьях [9-11] рассматриваются вопросы по созданию и оптимизации водородной инфраструктуры для обеспечения растущего спроса на водород. В данных публикациях описывается доставка водорода посредством газопроводов.

В публикации Корнеева К.А. [12] описываются достижения Японии по применению водорода на малых электростанциях с ТЭ для нужд энергоснабжения коммерческих объектов и промышленных предприятий, а так же на автомобильном и железнодорожном транспорте. В данной работе представлено текущее состояние инфраструктуры по производству электролизного водорода.

В статье [13], автор Галингер А.А. рассматриваются перспективные направления внедрения водородных технологий в различные отрасли промышленности России, в частности транспортную и металлургическую. Однако, переход на водород приводит к удорожанию конечной продукции, что является одним из сдерживающих факторов для применения данной технологии.

В представленных публикациях основное внимание уделяется областям применения водорода, способам производства с целью его удешевления. Однако, в литературе не освещаются вопросы комбинирования производства водорода с другими продуктами, например, тепловой и электрической энергией.

Гибридные энергетические комплексы рассматриваются в достаточно большом числе отечественных и зарубежных публикаций, в которых освещаются различные варианты комбинирования установок. Так, например, в статьях [14,15] рассматриваются комбинации установок на базе возобновляемых источниках (ветроустановки, гелиоустановки, установки, использующие энергию волн и другие), накопители электрической энергии и источники на органическом топливе. В качестве традиционной энергоустановки, зачастую, используются дизельные генераторы. В отчете [16] рассматриваются комбинации установок на базе ВИЭ и электрохимических накопителей энергии.

В рассмотренной литературе основное внимание уделено производству теплоты и электроэнергии на гибридных энергокомплексах, при этом недостаточно освещены вопросы производства водорода для заправки автомобильного транспорта.

Цель исследования заключается в разработке методических положений по определению показателей эффективности гибридных энергокомплексов с производством водорода и проведении на базе разработанной методики оценки влияния величины установленной мощности фотоэлектрических преобразователей и стоимости отпускаемого водорода на общие технико-экономические показатели энергокомплекса.

Научная значимость исследования заключается в систематизации и дополнении существующих теоретических знаний в области водородных технологий, в частности, расширении сферы применения электролизного производства водорода за счет его комбинирования с когенерационным производством тепловой и электрической энергии.

Практическая значимость исследования заключается в применении полученных результатов при проектировании и эксплуатации водородных заправочных станций, интегрированных в состав газопоршневых мини-ТЭЦ. Ожидается, что результаты исследования позволят производить более точную технико-экономическую оценку подобного рода энергокомплексов.

Материалы и методы (Materials and methods)

Схема энергокомплекса приведена на рисунке 1. Выработанная электрическая энергия на фотоэлектрической установке (ФЭУ) направляется на электролизную установку, где вырабатываются водород и кислород, которые с помощью компрессоров аккумулируются в емкостях хранения. Водород направляется на заправку автомобилей, кислород закачивается в баллоны и отпускается потребителям. В летний период при высокой солнечной инсоляции часть электрической энергии ФЭУ направляется в инвертор, где осуществляется преобразование постоянного тока ФЭУ в переменный и подается на шины малой ТЭЦ, замещая выработку электроэнергии на двигателе. При снижении выработки электроэнергии на ФЭУ часть энергии от двигателя может подаваться через выпрямитель на электролизер. Отпуск теплоты на малой ТЭЦ осуществляется от рубашки охлаждения, маслоохладителя, газоводяного подогревателя двигателя и пикового котла.

Для оценки эффективности предлагаемой схемы рассмотрено сооружение энергокомплекса в Волгоградской области (г. Камышин) на автомобильной трассе Р-228. Данные по солнечной инсоляции приняты по [17] и приведены в таблице 1. Расчетная электрическая нагрузка предприятия $N_s = 5 \text{ MBm}$, тепловая нагрузка $Q_m^p = 10,55 \text{ MBm}$, суточный расход водорода $P_{H_2} = 65 \frac{\text{кг}}{\text{сут}}$, кислорода $P_{O_2} = 520 \frac{\text{кг}}{\text{сут}}$, количество заправляемых автомобилей 40 авто/сут.

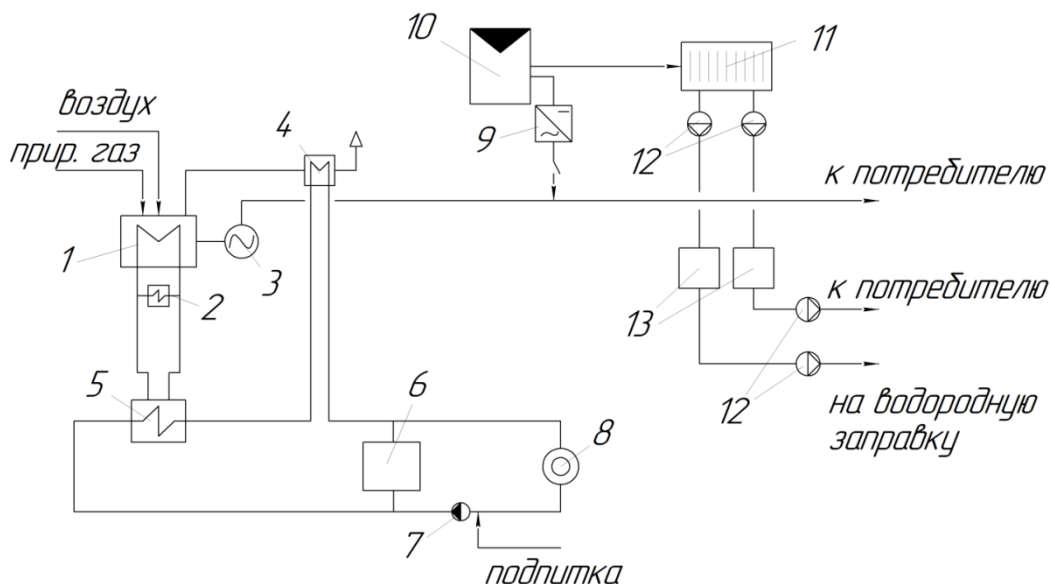


Рис. 1. Схема энергокомплекса с производством водорода, кислорода, электрической и тепловой энергии: 1 – рубашка охлаждения, 2 – маслоохладитель, 3 – генератор, 4 – газоводяной подогреватель, 5 – теплообменник промежуточного контура, 6 – пиковый водогрейный котел (ПВК), 7 – сетевой насос, 8 – тепловой потребитель, 9 – инвертор, 10 – фотоэлектрическая установка, 11 – электролизная установка, 12 – компрессоры водорода и кислорода, 13 – емкости хранения водорода и кислорода

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 1. Schematic of an energy complex with production of hydrogen, oxygen, electric and thermal energy:

1 – water jacket, 2 – oil cooler, 3 – electric power generator, 4 – gas-water heater, 5 – intermediate circuit heat exchanger, 6 – peak-load boiler, 7 – network pump, 8 – consumer of the heat, 9 – inverter, 10 – photovoltaic system, 11 – electrolyser, 12 – hydrogen and oxygen compressors, 13 – hydrogen and oxygen storage capacity

Исходными данными для определения количественных характеристик водородной заправки являются суточное потребление водорода $Q_{H_2}^{\text{сут}}$, кг/сут. и давление водорода после компримирования, $P_{H_2}^{\text{вых}}$, бар.

Так как в каталогах электролизных установок указывается не массовый, а объемный расход, то требуется осуществить перевод по выражению (1), $\frac{нм^3(H_2)}{час}$:

$$V_{ЭУ, H_2}^{ном} = \frac{\frac{Q_{H_2}^{сум}}{\tau_{сд}^{мин}} RT_{н.у.}}{P_{н.у.} \mu_{H_2}} \quad (1)$$

где $T_{н.у.}$, $P_{н.у.}$ – температура и давление водорода, соответствующие нормальным условиям, К, Па; μ_{H_2} – молярная масса водорода, кг/кмоль, $\tau_{сд}^{мин}$ – минимальная продолжительность светового дня в году, ч.

Электрическая мощность и суточный расход электроэнергии для производства требуемого количества водорода определяются по выражениям, кВт; кВт ч/сут.

$$\mathcal{E}_{ЭУ}^{час} = q_{H_2}^3 \cdot V_{ЭУ, H_2}^{ном} \quad (2)$$

$$\mathcal{E}_{ЭУ}^{сум} = \mathcal{E}_{ЭУ}^{час} \cdot \tau_{сд}^{мин} \quad (3)$$

где $q_{H_2}^3$ – удельный расход электроэнергии на процесс электролиза, $\frac{кВт \cdot ч}{нм^3(H_2)}$.

Часовой и суточный расход химически очищенной воды на процесс электролиза, м³/ч, м³/сут.

$$V_{H_2O}^{час} = V_{H_2O}^{уд} \cdot V_{ЭУ, H_2}^{ном} \quad (4)$$

$$V_{H_2O}^{сум} = V_{H_2O}^{час} \cdot \tau_{сд}^{мин} \quad (5)$$

где $V_{H_2O}^{уд}$ – величина удельного расхода воды на процесс электролиза, $\frac{кг(H_2O)}{нм^3(H_2)}$.

Известно, при процессе электролиза воды водород и кислород образуются в массовом соотношении $\frac{m(O_2)}{m(H_2)} = 8$, тогда массовая производительность электролизной установки по кислороду составляет, кг(O₂)/сут.:

$$Q_{O_2}^{ном} = 8 \cdot Q_{H_2}^{ном} \quad (6)$$

Из-за того, что процесс компримирования имеет непостоянный характер, то суммарное суточное потребление электроэнергии на сжатие получаемых газов определяется с учетом полного суточного времени работы компрессорной установки, $\frac{ч}{сут}$:

$$\tau_{комп, H_2}^{сум} = n_{авто}^{сум} \cdot \tau_{авто}^{ед} \quad (7)$$

где $n_{авто}^{сум}$ – количество автомобилей, запрашиваемых на ВЗС за сутки, $\frac{шт}{сут}$, $\tau_{авто}^{ед}$ – время заправки водородного автомобиля, мин.

Тогда масса водорода, потребляемая на ВЗС, определяется как, кг/сут.:

$$Q_{H_2, ед}^{авт} = \frac{Q_{H_2}^{ном}}{n_{авто}^{сум}} \quad (8)$$

Итак, через массовое количество необходимого водорода, а также время, необходимое на заправку одного автомобиля, можно найти требуемую объемную производительность компрессора, установленного на ВЗС, $\frac{нм^3}{ч}$:

$$V_{H_2, расч}^{комп} = \frac{\frac{60}{\tau_{авто}} \cdot Q_{авто}^{H_2, ед} \cdot R \cdot T_{нв}}{\mu_{H_2} \cdot P_{запр}^{H_2}} \quad (9)$$

где $T_{нв}$ – температура окружающего воздуха, К; $P_{запр}^{H_2}$ – давление водорода в топливных баках автомобиля, Па.

Объем электроэнергии, потребляемой водородным компрессором, $\frac{кВт \cdot ч}{сут}$:

$$\mathcal{E}_{H_2}^{комп(сут)} = \frac{V_{H_2, расч}^{комп}}{V_{H_2, ном}^{комп}} \cdot N_{комп, H_2}^{ном} \cdot \tau_{комп, H_2}^{сут} \quad (10)$$

Аналогично, чтобы выбрать кислородный компрессор, необходимо определить объемную производительность электролизной установки по кислороду, $\frac{нм^3(O_2)}{час}$:

$$V_{эу, O_2}^{ном} = \frac{Q_{O_2}^{ном} R T_{н.у.}}{P_{н.у.} \mu_{O_2}} \quad (11)$$

В этом случае, количество электроэнергии, необходимое для работы кислородного компрессора будет определяться как, $\frac{кВт \cdot ч}{сут}$:

$$\mathcal{E}_{O_2}^{комп(сут)} = \frac{V_{O_2, расч}^{комп}}{V_{O_2, ном}^{комп}} \cdot N_{комп, O_2}^{ном} \cdot \tau_{сд}^{мин} \quad (12)$$

Тогда, с учетом процесса электролиза и последующего компримирования полученных продуктов, суммарный суточный расход электроэнергии на ВЗС рассчитывается следующим образом, $\frac{кВт \cdot ч}{сут}$:

$$\mathcal{E}_{\Sigma H_2, O_2}^{сут} = \mathcal{E}_{эу}^{сут} + \mathcal{E}_{H_2}^{комп(сут)} + \mathcal{E}_{O_2}^{комп(сут)} \quad (13)$$

Предполагая уровень потребления водорода и кислорода постоянным на протяжении года, расход электроэнергии на ВЗС и компримирование кислорода составит, $\frac{МВт \cdot ч}{год}$:

$$\sum \mathcal{E}_{H_2, O_2}^{год} = \sum_{i=1}^{365} \mathcal{E}_{\Sigma H_2, O_2}^i \quad (14)$$

Объем емкостей для хранения водорода и кислорода определяется как, $м^3$.

$$V_{xp}^{H_2} = V_{эу, H_2}^{сут} \cdot \tau_{зап}^{H_2} \quad (15)$$

$$V_{xp}^{O_2} = V_{эу, O_2}^{сут} \cdot \tau_{зап}^{O_2} \quad (16)$$

где $V_{эу, H_2}^{сут}$, $V_{эу, O_2}^{сут}$ – суточная объемная производительность электролизной установки по водороду и кислороду, $\frac{м^3}{сут}$, $\tau_{зап}^{H_2}$, $\tau_{зап}^{O_2}$ – время обеспечения резерва водородом и кислородом на случай невозможности работы электролизной установки, сут.

По результатам расчетов определяется основное оборудование электролизной части (электролизеры, компрессоры и емкости хранения водорода и кислорода).

По климатическим данным района расположения энергокомплекса определены облачность и посуточная продолжительность светового дня за последние 5 лет [17]. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Среднемесячные значения продолжительности инсоляции и уровня облачности

Monthly averages of insolation duration and cloudiness level

Месяц	Суточная продолжительность инсоляции, ч	Среднесуточная облачность, п
Январь	8,6	0,8
Февраль	10,1	0,8
Март	11,9	0,6
Апрель	13,8	0,6
Май	15,4	0,5
Июнь	16,3	0,4
Июль	15,9	0,5
Август	14,4	0,4
Сентябрь	12,6	0,5
Октябрь	10,7	0,6
Ноябрь	9,1	0,7
Декабрь	8,1	0,8

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Удельный месячный приход инсоляции, Вт/м²,

$$W_{y\partial,i}^{мес} = W_{y\partial,i}^{сут} \cdot n_{\partial,i} \quad (17)$$

где $W_{y\partial,i}^{сут}$ – удельный суточный приход инсоляции, падающей на наклонную площадку в i -ом месяце, Вт/м², $n_{\partial,i}$ – число суток в i -ом месяце.

Удельное годовое поступление солнечной энергии, Вт/м²

$$W_{y\partial}^{\text{г}} = \sum_{i=1}^{365} W_{y\partial,i}^{мес} \quad (18)$$

Количество солнечных панелей определяется как, шт.:

$$n_{\Phi\Pi} = \frac{\mathcal{E}_{\Sigma H_2, O_2}^{сут} \cdot 10^3}{W_{y\partial,i}^{\min} \cdot \eta_{\Phi\Pi}^* \cdot \eta_{инв} \cdot S_{\Phi\Pi}} \quad (19)$$

где $W_{y\partial,i}^{\min}$ – минимальное удельное поступление солнечной энергии, Вт/м², $\eta_{\Phi\Pi}^*$ – КПД фотоэлектрической панели с учетом поправки на температуру, $\eta_{инв}$ – КПД инвертора, $S_{\Phi\Pi}$ – площадь рабочей поверхности фотоэлектрической панели, м².

Помимо облачности, на эффективность работы фотоэлектрических преобразователей также оказывает влияние нагрев поверхности солнечных панелей, что описывается в [18].

Связь между температурой окружающего воздуха и поверхности ФЭП можно определить как, °C :

$$t_{\Phi\Pi} = t_{возд} + \frac{W_{y\partial,i}}{800} \cdot (t_{н.экс} - 20^\circ C) \quad (20)$$

где $t_{н.экс}$ – эксплуатационная температура фотоэлектрической панели (в среднем для современных моделей ФЭП эта величина составляет порядка ~35-45 °C); $t_{возд}$ – температура окружающего воздуха, °C .

Учитывая это, корректировка КПД солнечных панелей определяется как:

$$\eta_{\Phi\Pi}^* = \eta_{\Phi\Pi} \cdot (1 - 0,0045 \cdot (t_{\Phi\Pi} - 25)) \quad (21)$$

где $\eta_{ФЭП}$ – номинальный КПД фотоэлектрических преобразователей.

Выбор числа солнечных батарей производится из условия полного обеспечения ВЗС на режиме наименьшей выработки электроэнергии ФЭП. Тогда на режимах при $W_{y\partial,i}^{мес} > W_{y\partial,i}^{min}$, избыточная электрическая энергия от ФЭУ будет передаваться на шины малой ТЭЦ, обеспечивая экономию органического топлива. Избыточное количество электрической энергии ФЭУ определяется из выражения, $кВт\cdot ч/сут., кВт\cdot ч/год$:

$$\mathcal{E}_i^{изб} = 10^{-3} \cdot W_{y\partial,i}^{мес} \cdot \eta_{ФЭП}^* \cdot \eta_{инв} \cdot n_{ФЭП} - \mathcal{E}_{\Sigma H_2, O_2}^{уст} \quad (22)$$

$$\mathcal{E}_{год}^{изб} = \sum_{i=1}^{365} \mathcal{E}_i^{изб} \cdot n_{\partial,i} \quad (23)$$

Капитальные затраты в газопоршневую мини-ТЭЦ, фотоэлектрическую установку, инверторы, электролизную установку, а также системы хранения и компримирования водорода и кислорода рассчитываются по следующим выражениям [19]:

$$K_{мТЭЦ} = k_{ГПУ} \cdot N_{ГПУ}^{уст} + k_{ПВК} \cdot Q_{ПВК}^{уст} \quad (24)$$

$$K_{сФЭУ} = k_{ФЭП} \cdot N_{ФЭП}^{уст} \quad (25)$$

$$K_{инв} = k_{инв} \cdot N_{инв}^{уст} \quad (26)$$

$$K_{ЭУ} = 11,805 \cdot 10^6 \cdot N_{ЭУ}^{0,3133} \quad (27)$$

$$K_{хран}^{H_2, O_2} = k_{хран}^{H_2} \cdot V_{хран}^{H_2} + k_{хран}^{O_2} \cdot V_{хран}^{O_2} \quad (28)$$

$$K_{комп}^{H_2, O_2} = 180437 \cdot \left(N_{комп, H_2}^{0,504} + N_{комп, O_2}^{0,504} \right) \quad (29)$$

где $k_{ГПУ}$, $k_{ПВК}$, $k_{ФЭП}$, $k_{инв}$ – удельные капитальные вложения в ГПУ, ПВК, ФЭП, инверторы, $\frac{руб.}{кВт}$; $k_{хран}^{H_2}$, $k_{хран}^{O_2}$ – удельные капитальные вложения в емкости хранения водорода и кислорода, $\frac{руб.}{м^3}$; $N_{ГПУ}^{уст}$, $Q_{ПВК}^{уст}$, $N_{ФЭП}^{уст}$, $N_{инв}^{уст}$, $N_{ЭУ}$, $N_{комп, H_2}$, $N_{комп, O_2}$ – установленные мощности газопоршневой установки, пиковых котлов, солнечных панелей, инвертора, электролизеров, системы компримирования водорода и кислорода, $кВт$; $V_{хран}^{H_2}$, $V_{хран}^{O_2}$ – объемы ресиверов для хранения водорода и кислорода, $м^3$.

Тогда полные капитальные вложения в энергокомплекс можно определить как:

$$K = K_{мТЭЦ} + K_{сФЭУ} + K_{инв} + K_{ЭУ} + K_{хран}^{H_2, O_2} + K_{комп}^{H_2, O_2} \quad (30)$$

Для оценки экономической эффективности будем оперировать величиной чистого дисконтированного дохода (ЧДД), руб.

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T \left[c_{\mathcal{E}} \mathcal{E}^t + c_Q Q^t + c_{H_2} G_{H_2}^t + c_{O_2} G_{O_2}^t - c_T B^t - c_B G_B - p \cdot K \right] \cdot (1+E)^{-t} - K \cdot (1+E)^{-t} \quad (31)$$

где c_{H_2} , c_{O_2} , c_Q , $c_{\mathcal{E}}$ – тариф на водород, кислород, тепло и электроэнергию, руб./кг, руб./ГДж, руб./кВт·ч, c_T – стоимость топлива, руб./кг.у.т., $G_{H_2}^t$, $G_{O_2}^t$, Q^t , $\mathcal{E}^t$ – производительность энергокомплекса по водороду и кислороду, а также выработка тепла и электроэнергии в годовом исчислении, кг/год, ГДж/год, кВт·ч/год, B^t – расход топлива в годовом исчислении поршневой установкой и пиковой котельной, кг.у.т./год, c_B – тариф на воду, руб./м³, G_B – годовое потребление воды, $кг/м^3$, p – доля амортизационных отчислений на ремонт и обслуживание, 1/год, K – полные капитальные затраты в источник, руб., E – норма дисконта, T – горизонт расчета, лет.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

В соответствии с разработанными методическими положениями был произведен расчет количественных показателей условного энергокомплекса, обеспечивающего завод по ремонту промышленного оборудования «Ротор», находящийся в промзоне г. Камышин тепловой и электрической энергией, другие заводы промзоны – кислородом, а также водородную заправку, располагаемую на трассе Р-228 в непосредственной близости от энергокомплекса.

Энергокомплекс состоит из трех газопоршневых двигателей, двух пиковых водогрейных котлов, двух электролизных установок, системы компримирования и хранения газов, а также фотоэлектрической установки. Установленная мощность системы компримирования, объем емкостей хранения, а также мощность электролизной установки зависят от номинальной установленной мощности фотоэлектрической установки, которая рассматривается в пределах от 0,5 МВт до 3 МВт. Электрическая нагрузка потребителя $N_e = 5 \text{ MBm}$, тепловая нагрузка $Q_m'' = 10,55 \text{ MBm}$.

Задавшись суточным потреблением водорода и кислорода, равными 65 и 520 кг/сут. соответственно, а также зная географо-климатические данные г. Камышин, можно определить выработку водорода и кислорода при переменной установленной мощности фотоэлектрической части комплекса (табл. 2):

Таблица 2

Table 2

Годовые количественные показатели фотоэлектрической установки

Annual quantitative indicators of the photovoltaic plant

Величина	Номинальная мощность ФЭУ, МВт				
	0,5	0,9	1,5	2,0	3,0
Номинальная мощность ЭУ, кВт	672	936	1200	1200	1200
Годовая выработка водорода, кг/год	17432	21994	23725	23725	23725
Годовая выработка кислорода, кг/год	139456	175951	189800	189800	189800
Величина годовой недовыработки водорода, кг/год	6293	1731	0	0	0
Величина годовой недовыработки кислорода, кг/год	50344	13849	0	0	0
Избыточная годовая выработка электрической энергии СФЭУ, МВт*ч/год	0	384	1604	2687	4852

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Из таблицы 2 видно, что полное покрытие энергокомплексом требуемой нагрузки по водороду и кислороду достигается только при величине установленной мощности СФЭУ от 1,5 МВт и выше. При этом, начиная от мощности ФЭУ, равной 0,9 МВт, параллельно с недовыработкой водорода и кислорода наблюдается избыточная выработка электроэнергии. Это вызвано неравномерностью инсоляции на протяжении года, поэтому при данной мощности СФЭУ возможна избыточная выработка электроэнергии на летнем режиме работы.

Учитывая количественные показатели фотоэлектрической установки, а в особенности величину избыточной выработки электроэнергии от СФЭУ, был произведен расчет количественных показателей газопоршневых установок (табл. 3):

Таблица 3

Table 3

Годовые количественные показатели газопоршневых установок

Annual quantitative indicators of gas piston units

Величина, ед. измерения	Номинальная мощность СФЭУ, МВт				
	0,5	0,9	1,5	2,0	3,0
Годовая выработка электроэнергии газопоршневой установки, МВт*ч/год	37490	37105	35890	34803	32637
Годовая выработка электроэнергии гибридной мини-ТЭЦ, МВт*ч/год	37490	37490	37490	37490	37490
Годовая выработка теплоты на газопоршневой установке, МВт*ч/год	29380	29308	28875	28400	27440
Годовая выработка теплоты на пиковой котельной, МВт*ч/год	11100	11180	11610	12090	13043
Годовая выработка тепла на гибридной мини-ТЭЦ, МВт*ч/год	40480	40480	40484	40480	40480
Годовой расход условного топлива на газопоршневой установке, т у.т./год	10710	10600	10250	9942	9323
Годовой расход условного топлива на пиковой котельной, т у.т./год	1490	1500	1559	1623	1751
Годовой расход топлива мини-ТЭЦ, т у.т./год	12200	12100	11810	11560	11074

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Из данной таблицы видно, что при изменении установленной мощности СФЭУ, и, как следствие, избыточной выработки электроэнергии от солнечных панелей, происходит изменение режимов работы ГПД и ПВК. Так при увеличении мощности СФЭУ снижается годовая выработка тепловой и электрической энергии ГПД, ввиду разгрузки двигателей, однако, для поддержания графика теплового потребления необходимо увеличение нагрузки пикового водогрейного котла. Такое изменение характера работы оборудования газопоршневой мини-ТЭЦ соответствующим образом сказывается на потреблении топлива. Однако, перерасход топлива ПВК незначителен по сравнению с экономией топлива ГПУ, поэтому разгрузка ГПУ за счет избыточной выработки СФЭУ приводит к общей экономии топлива на газопоршневой мини-ТЭЦ.

С учетом количественных показателей фотоэлектрической и газопоршневой установок был произведен расчет экономических показателей, таких как чистый дисконтированный доход, индекс доходности, дисконтированный срок окупаемости и внутренняя норма доходности. В рамках расчета были приняты следующие значения

$$\begin{aligned} & \text{удельных капиталовложений в составляющие энергокомплекса: } k_{\text{ГПУ}} = 92105 \frac{\text{руб}}{\text{кВт}}, \\ & k_{\text{ПВК}} = 5040 \frac{\text{тыс.руб}}{\text{кВт}}, \quad k_{\text{ФЭП}} = 54938 \frac{\text{руб}}{\text{кВт}}, \quad k_{\text{инв}} = 21000 \frac{\text{руб}}{\text{кВт}}, \quad k_{\text{ЭУ}} = 91000 \frac{\text{руб}}{\text{кВт}}, \\ & k_{\text{комп}}^{\text{H}_2} = 30,095 \frac{\text{тыс.руб}}{\text{кВт}}, \quad k_{\text{комп}}^{\text{O}_2} = 28,954 \frac{\text{тыс.руб}}{\text{кВт}}, \quad k_{\text{хран}}^{\text{H}_2} = 5400 \frac{\text{руб}}{\text{кг}}, \quad k_{\text{хран}}^{\text{O}_2} = 320 \frac{\text{руб}}{\text{кг}}, \\ & k_{\text{подк}}^{\text{ЭУ}} = 17712 \frac{\text{руб}}{\text{кВт}}, \quad k_{\text{подк}}^{\text{тэ}} = 1677,6 \frac{\text{тыс.руб}}{\text{МВт}} \end{aligned}$$

При определении результатов производственной деятельности были приняты стоимости отпускаемой тепловой, электрической энергии, водорода и кислорода

$$\begin{aligned} & \text{соответственно равные: } c_{\text{э}} = 585 \frac{\text{коп}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}, \quad c_{\text{Q}} = 2297,3 \frac{\text{руб}}{\text{Гкал}}, \quad c_{\text{H}_2} = 19185 \frac{\text{руб}}{\text{кг}}, \\ & c_{\text{O}_2} = 780,5 \frac{\text{руб}}{\text{кг}}. \end{aligned}$$

Результаты расчета экономических показателей энергокомплекса представлены в таблице 4:

Таблица 4
Table 4

Экономические показатели энергокомплекса в зависимости от мощности ФЭУ
Economic indicators of the energy complex depending on the capacity of PFCs

Величина	Номинальная мощность ФЭУ, МВт				
	0,5	0,9	1,5	2,0	3,0
Капитальные затраты, млн. руб.	978	1015	1072	1110	1186
Полные результаты проекта, млн. руб.	729	845	889	889	889
Суммарные затраты на проект, млн. руб.	134	135	136	137	138
Индекс доходности, руб./руб.	3,75	4,27	4,24	4,07	3,76
Дисконтированный срок окупаемости, лет	4,90	4,67	4,68	4,76	4,92
Внутренняя норма доходности, %	47,5	52,2	51,9	50,4	50,4
Чистый дисконтированный доход, млн. руб.	1943	2418	2559	2523	2453

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из таблицы видно, что с экономической точки зрения оптимальным является вариант схемы энергокомплекса с установленной мощностью фотоэлектрической части, равной 1,5 МВт. Дальнейшее увеличение мощности ФЭУ для разгрузки ГПУ является нецелесообразным, ввиду снижения чистого дисконтированного дохода и других экономических показателей.

Следует обратить внимание, что в данном случае принята текущая рыночная стоимость водорода высокой степени чистоты, порядка 99,9998%. Такие высокие требования к чистоте используемого водорода связаны с особенностями эксплуатации топливных элементов. В связи с этим, учитывая большие объемы производства водорода и

его высокую стоимость, данный энергокомплекс обладает завышенными экономическими показателями. С другой стороны, текущая рыночная стоимость водорода при использовании его как топлива для автомобилей на топливных элементах является неконкурентной, по сравнению с существующими моторными топливами. Поэтому был произведен расчет экономических показателей оптимального варианта энергокомплекса с установленной мощностью ФЭУ 1,5 МВт при переменной стоимости водорода. Результаты расчета приведены в таблице 5:

Таблица 5

Table 5

Экономические показатели энергокомплекса в зависимости от стоимости водорода

Economic indicators of the energy complex depending on the cost of hydrogen

Величина, размерность	Стоимость продаваемого водорода, тыс. руб./кг		
	19,2	9,8	0,48
Суммарные результаты проекта, млн. руб.	889	667	445
Индекс доходности, руб./руб.	4,24	3,00	1,76
Дисконтированный срок окупаемости, лет	4,68	5,51	8,02
Внутренняя норма доходности, %	51,9	40,3	26,1
Чистый дисконтированный доход, млн. руб.	2558	1577	596

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

На основании полученных результатов следует отметить, что несмотря на снижение стоимости продаваемого водорода, чистый дисконтированный доход остается положительным, при этом срок окупаемости увеличивается. Это объясняется положительным результатом продажи электрической, тепловой энергии и кислорода.

Заклучение и Выводы (Conclusions)

Был рассмотрен гибридный энергетический комплекс для выработки тепловой, электрической энергии, водорода и кислорода, который включает в себя газопоршневые двигатели, пиковые водогрейные котлы, солнечные фотоэлектрические установки, инверторы, систему компримирования водорода и кислорода и резервуары для хранения этих газов, а также электролизную установку. Водород и кислород производятся электролизной установкой, питаемой солнечными панелями, затем направляются компрессорами в емкости хранения, а оттуда потребителям. Пиковая электроэнергия, вырабатываемая ФЭУ на режимах, отличных от режима с наихудшей инсоляцией, направляется на разгрузку газопоршневых двигателей, за счет чего достигается экономия ископаемого топлива.

Для проведения расчетного эксперимента и анализа различных конфигураций системы были использованы географо-климатические данные, характерные для г. Камышина. Представлен метод определения количественно-экономических показателей гибридного энергокомплекса. В частности, использовались такие критерии экономической эффективности, как внутренняя норма доходности, чистый дисконтированный доход, дисконтированный срок окупаемости и индекс доходности.

По итогу расчетно-теоретического анализа количественных характеристик было выявлено, что для полного обеспечения ВЗС водородом требуется величина установленной мощности ФЭП в диапазоне от 1,5 МВт и более. В процессе определения экономических показателей эффективности установлено, что повышение мощности ФЭП сверх 1,5 МВт не является оптимальным, поскольку приводит к снижению величины ЧДД и увеличению ДСО.

Экономические показатели при оптимальной установленной мощности ФЭП, равной при данных условиях 1,5 МВт и стоимости реализуемого водорода 19,2 – 0,48 тыс.руб./кг, равны:

$ДСО = 4,7 - 8,0$ года, $ИД = 4,2 - 1,8$ руб./руб., $ЧДД = 2558 - 596$ млн. руб., $ВНД = 52 - 26$ %.

Литература

1. Попель, О.С. Энергоустановки на основе топливных элементах: современное состояние состояние и перспективы/ О.С. Попель, А.Б. Тарасенко, С.П. Филиппов//Теплоэнергетика, 2018, №12. С.3-23.

2. Фомин, В. М. Водородная энергетика и современный транспорт / В. М. Фомин, Д. В. Шевченко // Транспорт на альтернативном топливе. – 2012. – № 2(26). – С. 56-60.
3. Тиунов, В. В. Анализ проблем использования водородного топлива на транспорте и в энергетике / В. В. Тиунов, П. В. Лыкасов // . – 2019. – Т. 1. – С. 231-236.
4. NAMI HYDROGEN. Автомобиль с низким углеродным следом на водородных топливных элементах. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://hydrogen.nami.ru/> – (Дата обращения: 10.04.2023).
5. Первый водородный электробус от «КАМАЗА» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://kamaz.ru/press/releases/pervyy_vodorobus_ot_kamaza/. – (Дата обращения: 10.04.2023).
6. Валеева, Г. Р. Водородные технологии, применимые в дорожном транспорте / Г. Р. Валеева // Молодежная наука: труды XXVI Всероссийской студенческой научно-практической конференции КРИЖТ ИрГУПС, Красноярск, 22 апреля 2022 года. Том 1. – Красноярск: Красноярский институт железнодорожного транспорта - филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения, 2022. – С. 43-47.
7. Филиппов, С. П. Топливные элементы и водородная энергетика / С.П. Филиппов, А. Э. Голодницкий, А. М. Кашин// ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА, 2020, №11(153). С. 28-39.
8. Аминов, Р.З. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями/ Р.З. Аминов, А.Н. Байрамов//Саратовский научный центр РАН.- М.: Наука, 2016. - 254 с.
9. André, J.; Auray, S.; De Wolf, D.; Memmah, M.-M.; Simonnet, A. Time development of new hydrogen transmission pipeline networks for France. Int. J. Hydrogen Energy 2014, 39, 10323–10337, doi:10.1016/j.ijhydene.2014.04.190.
10. Weber, A.C.; Papageorgiou, L.G. Design of hydrogen transmission pipeline networks with hydraulics. Chem. Eng. Res. Des. 2018, 131, 266–278, doi:10.1016/j.cherd.2018.01.022.
11. Lahnaoui, A.; Wulf, C.; Heinrichs, H.; Dalmazzone, D. Optimizing hydrogen transportation system for mobility by minimizing the cost of transportation via compressed gas truck in North Rhine-Westphalia. Appl. Energy 2018, 223, 317–328, doi:10.1016/j.apenergy.2018.03.099.
12. Корнеев, К. А. Политика Японии в области развития водородной энергетики / К. А. Корнеев // Японские исследования. – 2020. – № 4. – С. 64-77. – DOI 10.24411/2500-2872-2020-10028.
13. Галингер, А. А. Оценка эффектов распространения водородных технологий для топливно-энергетического комплекса и экономики России / А. А. Галингер // Труды II Гранберговской конференции: Сборник докладов Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти академика А.Г. Гранберга «Пространственный анализ социально-экономических систем: история и современность», Новосибирск, 11–15 октября 2021 года / Сибирское отделение Российской академии наук Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН. – Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2021. – С. 345-353. – DOI 10.53954/9785604607893_345.
14. Pasquariello R. Gas turbine innovations, with or without hydrogen // «Turbomachinery International». Dec. 4, 2020.
15. Howarth R.W. How green is blue hydrogen? / Howarth R.W., Jacobson M.Z. // Energy Sci Eng. 2021;9:1676– 1687. DOI 10.1002/ese3.956
16. World's largest hydrogen fuel cell power plant / Fuel Cells Bulletin, Volume 2021, Issue 11, 2021, ISSN 1464-2859, DOI 10.1016/S1464-2859(21)00602-7.
17. NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) Higher Resolution Daily Time Series Renewable Energy Community. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. – (Дата обращения: 7.12.2022).
18. Головкин, С. В. Анализ влияния климатических факторов на выбор типа солнечной панели / С. В. Головкин, Д. А. Задоркин // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2020. – № 2(70). – С. 21-26.
19. Байрамов А.Н. Разработка научных основ повышения эффективности АЭС при комбинировании с водородным комплексом. / Байрамов А.Н. // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: Саратов, 2021. – 397 с.

Авторы публикации

Николаев Юрий Евгеньевич – д.т.н., профессор кафедры «Тепловая и атомная энергетика» имени А.И. Андрющенко, Институт энергетики, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. e-mail: niko00949@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8655-448X

Айдаров Максим Александрович – ассистент кафедры «Тепловая и атомная энергетика» имени А.И. Андрющенко, Институт энергетики, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. e-mail: maksim.aydarov@mail.ru. SPIN-код: 2425-8970

References

1. Popel', O. S. Fuel Cell Based Power-Generating Installations: State of the Art and Future Prospects/ O. S. Popel', A. B. Tarasenko, and S. P. Filippov// *Thermal Engineering*, 2018, №12. p.3-23 (in Russ.).
2. Fomin, V.M. Hydrogen energetics and modern transport / V.M. Fomin, D.V. Shevchenko // *Alternative fuel vehicles*. – 2012, 26(2): 56-60 (in Russ.).
3. Tiunov, V.V. Analysis of the hydrogen fuel problems harnessing for transport and energetics objects / Tiunov V.V., Lykasov P.V. // *Innovative Technologies: Theory, Tools, Practice*. – 2019; 1:231-236 (in Russ.).
4. NAMI Hydrogen. Low carbon footprint hydrogen fuel cell car. Available on: <https://hydrogen.nami.ru/> (10.04.2023)
5. The first hydrogen electric bus from KAMAZ. Available on: https://kamaz.ru/press/releases/pervyy_vodorobus_ot_kamaza/ (10.04.2023)
6. Valeeva, GR. Vodorodnye tekhnologii, primenimye v dorozhnom transporte // *Molodezhnaya nauka: trudy XXVI Vserossiiskoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii KrIZhT IrGUPS*, 2022: 43-47. (in Russ.).
7. Filippov, S. P. Fuel cells and hydrogen energy / S.P. Filippov, A. E. Golodnitsky, A. M. Kashin// *Energy Policy*. 2020; 153(11) (in Russ.).
8. Aminov, R.Z. Combining hydrogen energy cycles with nuclear power plants / R.Z. Aminov, A.N. Bairamov// *Saratov Scientific Center RAS.- M.: Science*, 2016: 254 (in Russ.).
9. André, J.; Auray, S.; De Wolf, D.; Memmah, M.-M.; Simonnet, A. Time development of new hydrogen transmission pipeline networks for France. *Int. J. Hydrogen Energy* 2014, 39, 10323–10337, doi:10.1016/j.ijhydene.2014.04.190.
10. Weber, A.C.; Papageorgiou, L.G. Design of hydrogen transmission pipeline networks with hydraulics. *Chem. Eng. Res. Des.* 2018, 131, 266–278, doi:10.1016/j.cherd.2018.01.022.
11. Lahnaoui, A.; Wulf, C.; Heinrichs, H.; Dalmazzone, D. Optimizing hydrogen transportation system for mobility by minimizing the cost of transportation via compressed gas truck in North Rhine-Westphalia. *Appl. Energy* 2018, 223, 317–328, doi:10.1016/j.apenergy.2018.03.099.
12. Korneev, K. A. Japan's policy in the field of hydrogen energetics development / K. A. Korneev // *Japanese Studies in Russia*. – 2020; (4): 64-77. – DOI 10.24411/2500-2872-2020-10028. (in Russ.).
13. Galinger, A. A. Estimations of the effects of hydrogen technologies spread for russian energy sector and economy / A. A. Galinger // *Proceedings of the II Granberg Conference : Proceedings of the All-Russian Conference with international participation, dedicated to the memory of Academician A.G. Granberg "Spatial analysis of socio-economic systems: history and present"*, Novosibirsk, October 11-15, 2021 / Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Institute of Economics and Organization of Industrial Production SB RAS. – Novosibirsk: Siberian Branch RAS, 2021: 345-353. – DOI 10.53954/9785604607893_345. (in Russ.).
14. Pasquariello R. Gas turbine innovations, with or without hydrogen // *«Turbomachinery International»*. Dec. 4, 2020.
15. Howarth R.W. How green is blue hydrogen? / Howarth R.W., Jacobson M.Z. // *Energy Sci Eng.* 2021;9:1676-1687. DOI 10.1002/ese3.956
16. World's largest hydrogen fuel cell power plant / *Fuel Cells Bulletin*, Volume 2021, Issue 11, 2021, ISSN 1464-2859, DOI 10.1016/S1464-2859(21)00602-7.
17. NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) Higher Resolution Daily Time Series Renewable Energy Community. Available on: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. (7.12.2022).

18. Golovko, S. V. Analysis of influence of climatic factors on selecting types of solar panels / S. V. Golovko, D. A. Zadorkin // Bulletin of Astrakhan State Technical University. – 2020; 70(2): 21-26. (in Russ.).
19. Bairamov, A.N. *Razrabotka nauchnykh osnov povysheniya effektivnosti AES pri kombinirovanii s vodorodnym kompleksom* [dissertation]. Saratov; 2021. (in Russ.).

Authors of the publication

Yurii E. Nikolaev – Doctor of Engineering Science, professor of the department "Thermal and Nuclear Power Engineering" named after A.I. Andryushchenko, Energy Institute, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. e-mail: niko00949@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8655-448X

Maksim A. Aidarov – Postgraduate student, assistant of the department "Thermal and Nuclear Power Engineering" named after A.I. Andryushchenko, Energy Institute, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov e-mail: maksim.aydarov@mail.ru. SPIN-code: 2425-8970

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы.

Получено **14.12.2023 г.**

Отредактировано **19.02.2024 г.**

Принято **07.03.2024 г.**



ANALYSIS OF APPLICATION OF ENTROPY METHODS OF VIBRATION DIAGNOSTIC SIGNAL PROCESSING TO ASSESS TECHNICAL CONDITION OF PIPELINES

Gaponenko S.O., Kondratiev A.E., Kalinina M.V., Derbeneva A.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract. The purpose of this article is to review the existing reliability problems of pipeline systems of power complexes. The article considers the existing statistical and logistics systems, which allow to process diagnostic information when assessing the technical condition of pipelines. Modern diagnostic methods are mainly based on the use of vibration, sound, and ultrasonic sensors. The presence of a defect in a pipeline is determined by analysis of the amplitude of a diagnostic signal. Higher efficiency in detecting defects was shown by probability-statistical methods of signal analysis, which are based on chaos theory. One such method is entropy analysis. Analysis of modern signal processing methods has shown that methods based on chaos theory are the most effective. The possibility of using entropy indices as sensitive diagnostic signs is considered. Comparative analysis of signal processing was carried out using entropy methods (Shannon entropy, Kolmogorov entropy) and using known statistical and logistic methods (Fourier Transform, Wavelet Transform, Hilbert-Huang Transform). The analysis results showed that entropy indicators respond to a change in signal structure caused by the presence of a defect in the pipeline or Entropy analysis is a promising method of processing diagnostic signals when assessing the technical condition of pipelines.

Keywords: Analysis; application; entropy methods; processing; vibrodiagnostic signals; evaluation; technical condition; pipelines.

For citation: Gaponenko S.O., Kondratiev A.E., Kalinina M.V., Derbeneva A.A. Analysis of application of entropy methods of vibration diagnostic signal processing to assess technical condition of pipelines. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (2): 128-137. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-128-137.

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИЙНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Калинина М.В., Дербенева А.А.

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Резюме: Целью данной статьи является обзор существующих проблем надежности трубопроводных систем энергетических комплексов. Рассмотрены существующие статистические и логистические системы, позволяющие обрабатывать диагностическую информацию при оценке технического состояния трубопроводов. Современные методы диагностики в основном основаны на использовании вибрационных, звуковых и ультразвуковых датчиков. Наличие дефекта в трубопроводе определяется путем анализа амплитуды диагностического сигнала. Более высокую эффективность при обнаружении дефектов показали вероятностно-статистические методы анализа сигналов, основанные на теории хаоса. Одним из таких методов является энтропийный анализ. Анализ современных методов обработки сигналов показал, что наиболее эффективными являются методы, основанные на теории хаоса. Рассмотрена возможность использования энтропийных показателей в качестве чувствительных диагностических признаков. Проведен сравнительный анализ обработки сигналов с использованием энтропийных методов (энтропия Шеннона, энтропия Колмогорова) и известных статистических и логистических методов (преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, преобразование Гильберта-Хуанга). Результаты анализа показали, что энтропийные показатели реагируют на изменение структуры сигнала, вызванное наличием дефекта в трубопроводе.

или Энтропийный анализ является перспективным методом обработки диагностических сигналов при оценке технического состояния трубопроводов.

Ключевые слова: Анализ; применение; энтропийные методы; обработка; вибродиагностические сигналы; оценка; техническое состояние; трубопроводы.

Для цитирования: Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Калинина М.В., Дербенева А.А. Анализ применения энтропийных методов обработки вибродиагностических сигналов для оценки технического состояния трубопроводов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 128-137. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-128-137.

Introduction

Pipeline systems of energy complexes are considered critical structures, and high requirements are imposed on their safe and reliable operation.

Due to high operating parameters, such as operating pressure, flow rate, length, and increasing age of pipeline systems, there is a complex of problems related to safety, reliability, resource assessment, and risk [1].

The solution to these problems is ensured by timely diagnostics of pipeline systems. According to the results of diagnostics, pipelines are either allowed for further operation or undergo repair or replacement [2]. Modern methods of pipeline diagnostics are mainly based on the use of vibration, sound, and ultrasonic sensors [3]. Vibration diagnostic signals are used as diagnostic information. In this case, the presence of a defect in the pipeline is determined by analyzing the amplitude of the diagnostic signal.

To carry out a reliable assessment of the technical condition of the pipeline, it is necessary to properly extract the diagnostic information from the vibration signal [4,5]. The following methods are traditionally used for signal processing: wavelet transform, Fourier transform, S-transform, Hilbert-Huang transform. In this article, we will consider the possibility of using probabilistic-statistical methods of signal analysis, which are based on chaos theory.

Fast Fourier Transform

Fast Fourier transform (FFT) [6] is a kind of discrete Fourier transform (DFT), which is calculated by the formula:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (1)$$

where $X(k)$ — k -complex amplitude (component) of the spectrum; $x(n)$ — samples of a discrete signal (periodic with a period N or finite length N); W_N^{nk} — turning factor (or transformation kernel).

Direct calculation of the DFT by formula (1) for large N (when processing audio signals, the length of the audio signal can reach $2^{10} = 1024$) is ineffective, a large number of operations does not make it possible to provide real-time. Indeed, to calculate the N -point transformation, it is required to perform $(N-1)^2$ complex multiplications and $N(N-1)$ complex additions, that is, the amount of computation is of the order of N^2 operations of addition and multiplication of complex numbers [7]. To reduce computational costs, FFT algorithms have been developed based on the periodicity of the transformation kernel W_N^{nk} . The idea of the FFT is to divide the N -point sequence into two, from the DFT of which you can obtain the DFT of the original sequence, and continue this division of each new sequence until there are only two sequences left [8].

The main problem when applying the Fourier transform is the requirement to use only signals whose length must be with a power of two. For example, performing an FFT with an array of 512 or 1024 points of the signal is acceptable, but not with an array of 500 or 1000 points. As a result, a signal with a frequency of 1 kHz, taken at a sampling rate of 10 MHz, cannot be subjected to an FFT at its length of the period, which in these conditions will be 1000 points, then you will have to use a slightly larger area for analysis - 1.024 signal periods and thus distort the signal spectrum because the Fourier transform should be carried out exactly on the segment of the signal period or a multiple of it [9].

Another disadvantage of the FFT is that the Fourier transform does not reveal the peculiarities of the behavior of the spectral components in time. The signal is measured at certain points in time, and there is no information about its state in the intervals between these points.

Wavelet transform

The wavelet transform is similar to the windowed Fourier transform but has a completely different scoring function. The main difference is that the Fourier transform decomposes the signal into sine and cosine components, i.e. functions localized in Fourier space.

The wavelet transform, on the other hand, uses functions localized in both real and Fourier space. The wavelet transform can be expressed by the following equation:

$$F(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{(a,b)}^*(x) dx \quad (2)$$

where * - complex conjugacy symbol and function ψ - some function. The function can be chosen arbitrarily, but it must follow certain rules.

The wavelet transform is actually an infinite set of different transformations, depending on the evaluation function used to calculate it [10].

There are many types of classification of wavelet transform options. Consider a division based on wavelet orthogonality. In practice, orthogonal wavelets are used for discrete wavelet transforms and non-orthogonal wavelets for continuous ones. These two types of transformations have certain properties.

Discrete Wavelet Transform (DWT) is an implementation of a wavelet transform using a discrete set of wavelet scales and translations that obey certain specific rules [11]. DWT decomposes the signal into a mutually orthogonal set of wavelets, it is the main difference from the continuous wavelet transform (CWT).

A wavelet can be constructed from a scale function that describes its scalability properties. The limitation is that the scale function must be orthogonal to its discrete transformations, which implies some mathematical constraints on them, namely the homothety equation:

$$\Phi(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \Phi(Sx - k) \quad (3)$$

where S - the scale factor, is usually selected equal to two. The area under the function must be normalized, and the scaling function must be orthogonal to its numerical translations:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(x) \Phi(x + l) dx = \delta_{0,l} \quad (4)$$

After introducing some additional conditions, we obtain the result of all these equations, i.e. a finite set of coefficients a_k that determine the scaling function, as well as the wavelet. The wavelet is obtained from the scaling function as N , where N is an even integer. The set of wavelets then forms an orthonormal basis that is used to decompose the signal.

Continuous Wavelet Transform (CWT) is an implementation of a wavelet transform using arbitrary scales and arbitrary wavelets. The wavelets used are not orthogonal, and the data obtained during this transformation is highly correlated. For discrete-time sequences, you can also use this transform, with the restriction that the smallest wavelet translations should be equal to the data sampling. This is sometimes called Discrete-Time Continuous Wavelet Transform (DT-CWT) and is the most commonly used method for calculating CWT in practice [11].

With CWT, the definition of the wavelet transform is used directly, i.e. calculate the convolution of the scaled wavelet signal. For each scale, a set of the same length N as the input signal is obtained. Using M randomly selected scales, an $N \times M$ field is obtained that directly represents the time-frequency plane. The algorithm used for this calculation can be based on forward convolution or on convolution through multiplication in Fourier space, which is called the fast wavelet transform.

The choice of the wavelet for use in time-frequency decomposition is the most important step in determining the time and frequency resolution of the result. You cannot change the basic characteristics of the wavelet transform in this way, but you can increase the overall frequency or time resolution. This is directly proportional to the width of the used wavelet in real and Fourier space. For example, if we use the Morlet wavelet, then one can expect a high-frequency resolution since such a wavelet is very well localized in frequency. Conversely, using the derivative of Gaussian (DOG), we get good localization in time, but poor in frequency.

The reliability of the vibration signal analysis using the wavelet transform largely depends on the choice of the basis function. In this regard, the problem arises of the formation of an adaptive basis of the frequency-time conversion functionally dependent on the content of the vibroacoustic signals themselves.

Hilbert-Huang transform

The Hilbert – Huang transform [12] (HHT) is a transformation based on the assumption that any signal can be represented as a sum of oscillatory processes, each of which satisfies the symmetry condition and some residual, which is a trend.

The implementation of the Hilbert – Huang transform consists of two stages: empirical mode decomposition (EMD) and the Hilbert transform. The EMD method is intended for the analysis of non-stationary and non-linear processes. Unlike Fourier and wavelet analysis, EMD is straightforward, intuitive, and adaptive.

Empirical mode decomposition is implemented in several stages [13].

1. The position of all local extrema is determined in the signal $y(k)$.

2. The upper $u_t(k)$ and lower $u_b(k)$ envelopes of the process are calculated using a cubic spline, respectively.

The function of average values $m_1(k)$ between the envelopes is determined:

$$m_1(k) = \frac{u_t(k) + u_b(k)}{2} \quad (5)$$

The difference between the signal $y(k)$ and the function $m_1(k)$ gives the first sifting component - the function $h_1(k)$, which is the first approximation of the internal mode function:

$$h_1(k) = y(k) - m_1(k) \quad (6)$$

3. The operations are repeated in stages 1 and 2, in this case, instead of the function $y(k)$ the function $h_1(k)$ is taken, and then the second approximation to the first function of the internal mode is found:

$$h_2(k) = h_1(k) - m_2(k) \quad (7)$$

The sifting operation can be stopped at a given iteration value or at a given normalized squared difference between two successive iterations.

4. The last value $h_i(k)$ of iterations is taken as the highest-frequency function $c_1(k) = h_i(k)$ of the family of functions of the internal mode, which is directly included in the original signal $y(k)$. This allows us to subtract $c_1(k)$ from the signal and leave the lowest-frequency components in it:

$$r_1(k) = y(k) - c_1(k) \quad (8)$$

The function $r_1(k)$ is processed as new data using a similar technique with finding the second function of the internal mode - $c_2(k)$, after which the process continues.

So, the signal decomposition in the n -approximation is achieved:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n c_i(k) + r_n(k) \quad (9)$$

Decomposition is based on the assumption that any data consists of various simple internal mode oscillations. Each internal mode, linear or non-linear, represents a simple wobble containing the same number of extrema and zero crossovers. Moreover, the fluctuations are symmetrical about the local mean. At any moment of time, many internal oscillations can coexist, superimposed on each other [14]. The signal data itself is the sum of all mode waves.

The Hilbert-Huang transform is a time-frequency analysis of data and does not require an a priori functional transformation basis. Instantaneous frequencies are calculated from the derivatives of the phase functions by the Hilbert transformation of the basis functions [15].

S-transform

S-transform [16] (on behalf of the researcher Stockwell) is a relatively recently developed method of time-frequency analysis. The S-transform is a kind of windowed Fourier transform with a Gaussian windowing function of the form:

$$f(x) = ae^{-b(x-c)^2} \quad (10)$$

This operational method is based on the use of polynomial approximation as an operational calculus.

Mathematically, an S-transform is defined as follows:

$$S_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) |f| e^{-\pi(t-\tau)^2 f^2} e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (11)$$

S-transform combines features of FFT and wavelet transforms. The S-transform provides frequency-dependent resolution similar to the wavelet transform, while simultaneously providing a direct link to the linear Fourier spectrum like the short-term Fourier transform. The S-transform procedure is based on the Fourier transform and the use of a sliding window function, which is similar to the short-term Fourier transform; however, the width of the window function in the time domain will be inversely proportional to the frequency of the analysis. So, the window is wider in the low-frequency regions and narrower in the higher-frequency regions. As a result, the S-transform (like the wavelet transform) has a "fine" frequency resolution in the low-frequency region and a "coarse" resolution for the high-frequency components. S-transform is used to analyze short-duration transient signals. Examples of the use of S-transform are described in some engineering and biomedical fields.

Despite its important advantages, the S transform has limitations. First, because the windowing function narrows in time at higher analysis frequencies, the frequency resolution inevitably becomes worse. Poor frequency resolution can lead to poor performance or even erroneous results in practical applications. Secondly, the amplitude of the noise can be increased in the high-frequency region, which can lead to false conclusions when analyzing noisy signals.

Methods for entropy parameterization of diagnostic signals

The above signal processing methods are based on the registration and analysis of vibroacoustic signals. However, such signals have different sources, physical nature, and causes of occurrence. So, the typical methods of processing vibroacoustic signals have significant differences, which forces the use of several parallel mechanisms in diagnostic systems, which complicates these systems [17]. At the same time, these mathematical mechanisms often do not

allow detecting deviations in the technical state of objects that go beyond the previously described ones, especially at an early stage of the occurrence of these deviations. For example, if there is a vibrodiagnostic signal, the parameters of which do not exceed the set threshold values, but the signal carries information about the deviation of the state of the diagnosed object, then this signal can be ignored[18].

Considering the complexity of dynamic interactions in the presence of defects in pipeline systems, the use of traditional processing methods is insufficient. Equipment and pipelines of power systems and complexes often exhibit chaotic behavior, which is reflected in the nature of diagnostic signals.

Such irregular signal components cannot be effectively identified by traditional methods.

Modern methods of processing useful signals are mainly based on the analysis of the amplitude of the useful signal [19]. However, the amplitude is not a reliable diagnostic sign, since a large number of different factors can affect the change in amplitude, which is extremely problematic to take into account.

Methods of entropy parameterization of diagnostic signals (Shannon entropy, Kolmogorov entropy) can be successfully used to study chaotic oscillations in physical systems. Their use for the analysis of vibroacoustic signals will improve the reliability of the control of pipeline systems of power complexes and, as a result, will significantly increase the reliability of the operation of these facilities[20].

In this case, probabilistic and statistical methods of signal analysis, which are based on chaos theory, show high efficiency. It should be noted that the entropy indicators respond to changes in the signal structure caused by the presence of a defect or leak in the pipeline. At the same time, the entropy indices depend little on the amplitude. Let us consider the possibility of using entropy indicators as sensitive diagnostic signs[21].

Shannon's entropy

Shannon's entropy characterizes the degree of process variability. By increasing the value of Shannon's entropy, one can judge the effect of the defect on the signal under study[22]. The calculation of Shannon's entropy is based on the formula proposed by Claude Shannon to calculate the informational entropy:

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i, \quad (12)$$

where p_i is the probability of the value from the sample falling into the i -level.

Shannon's entropy quantifies the deviation of the distribution of the values of the time series by levels from the equiprobable one. If one of the levels is filled with values, the Shannon entropy is $H_{sh} = 0$. When the values are evenly distributed over the levels, Shannon's entropy is maximum and is equal to $\log n$, where n is the number of levels[23, 24].

So, the entropy of event X is the sum with the opposite sign of all the products of the relative frequencies of occurrence of an event i , multiplied by their own logarithms. This definition for discrete random events can be extended to the probability distribution function.

Shannon derived this definition of entropy from the following assumptions:

- the measure must be continuous; that is, a small change in the value of the probability value should cause a small resultant change in entropy;
- in the case when all are equally probable, an increase in the number of options should always increase the total entropy;
- it should be possible to make a choice in two steps, in which the entropy of the final result should be the sum of the entropies of the intermediate results[25].

Using Shannon's entropy, it is possible to quantitatively characterize the distribution of time series values. When the state of the system changes, the distribution of its parameters changes, which leads to a change in the entropy value. So, Shannon's entropy is a function of the state of the system, since it quantitatively estimates the measure of uncertainty in the values of the parameters that characterize the system.

Kolmogorov's entropy

Kolmogorov's entropy or, in other words, approximating entropy (ApEn) is an important characteristic of deterministic chaos. ApEn is defined as the rate at which information about the state of a dynamic system is lost over time[26].

When calculating the Kolmogorov entropy, the time series is divided into a sequence of vectors m , then the distance between two vectors $X(i)$ and $X(j)$ is determined:

$$d(X(i), X(j)) = \max_{k=1,2,\dots,m} (|x(i+k-1) - x(j+k-1)|) \quad (13)$$

where $i = 1, 2, \dots, N-m+1$, $j = 1, 2, \dots, N-m+1$ and N is the number of samples contained in the time series.

Then, for each vector $X(i)$ we calculate $C_i^m(r)$ – a measure describing the similarity between the vectors $X(i)$ and all other vectors:

$$C_i^m(r) = \frac{1}{N-(m-1)} \sum_{j \neq i} \theta \{r - d[X(i), X(j)]\}, \quad (14)$$

where $j = 1, 2, \dots, N - m + 1$; r - the value of the tolerance, which is the parameter of the noise filter.

Next, the average value of the logarithm $C_i^m(r)$ is calculated:

$$\varphi^m(r) = \frac{1}{N-(m+1)} \sum_i \ln[C_i^m(r)], \quad (15)$$

where $i = 1, 2, \dots, N - m + 1$.

Then the value of the Kolmogorov entropy:

$$ApEn(m, r) = \lim_{N \rightarrow \infty} [\varphi^m(r) - \varphi^{m+1}(r)], \quad (16)$$

In practice, a limited-time series is used, which consists of N reports [27], while the value of the Kolmogorov entropy of the time series is determined as follows:

$$ApEn(m, r, N) = \varphi^m(r) - \varphi^{m+1}(r) \quad (17)$$

Equation (17) shows the similarity between the reconstructed vectors m and $m + 1$ in the time series. This similarity indicates the regularity of the analyzed time series and affects the corresponding value of the Kolmogorov entropy $ApEn$ [28, 29]. The more regularity, the lower the entropy value.

At the same time, the Kolmogorov entropy expresses the regularity of time series in several dimensions and reflects more time information. This makes this parameter an attractive tool for monitoring the dynamics of the system, and information on the development of defects is important not only for diagnosing the current state of the controlled object but also for predicting its behavior in the future [30].

Conclusion

When assessing the technical condition of the pipeline by a specialist, it is important that diagnostic information is efficiently extracted from the signals of diagnostic sensors.

The effectiveness of diagnostic signs is determined, first of all, by the methods of processing the vibrodiagnostic signal. When assessing the technical condition, statistical, spectral and chaotic characteristics of digitized signals are used as primary features.

The choice of entropy parameters is due to the sensitivity of the Shannon entropy H_{sh} and the Kolmogorov entropy to the chaotic components of the vibrodiagnostic signal accompanying the manifestation of defects.

The results of the analysis showed that the entropy indicators respond to changes in the signal structure caused by the presence of a defect or leak in the pipeline. In this case, the entropy indices depend little on the amplitude. Entropy analysis is a promising method for processing diagnostic signals when assessing the technical condition of pipelines.

References

1. Gaponenko S.O., Kondratiev A.E. Nazarychev S.A. "Determination of informative frequency ranges for buried pipeline location control" *Helix*, vol. 8(1), 2018, pp. 2481-2487.
2. Zakharova V.E., Gaponenko, S.O., Kondratiev, A.E. "Mathematical modeling of low-frequency diagnostic vibration-acoustic vibrations of linear-extended energy objects of housing and communal services" *E3S Web of Conferences*, RSES 2020, 2020.
3. Shakurova, R.Z., Gaponenko, S.O., Kondratiev, A.E. "On the issue of inertial excitation of diagnostic low-frequency vibrations in pipelines of housing and communal services", *E3S Web of Conferences*, RSES 2020, 2020.
4. Kondratiev A.E., Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., Nazarychev S.A. "Acoustic-resonance method for control of the location of hidden hollow objects", *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 2019.
5. Kondratiev A.E., Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., Nazarychev S.A. "Information-measuring system for monitoring the location of underground gas pipelines on the basis of improved acoustic resonance method", *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 2019.
6. Rabiner L., Gold B. "Theory and Application of Digital Signal Processing" Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J. (1975) 762
7. Uljanova Ju.E., Babenko R.G., Chernov A.V. "The Time-And-Frequency Transformations Used in Digital Processing of Signals", *Global Nuclear Safety*, vol. 3(16), pp.36-42, 2015.
8. Elizarov A.A. "Implementation of fast Fourier transform algorithms", *Information and control systems in transport and industry*, pp.196-204, 2018.
9. Wang, Y., Zheng, L., Gao, Y., & Li, S. "Vibration Signal Extraction Based on FFT and Least Square Method", *IEEE Access*, vol. 8, 224092-224107, 2020.

10. Kukharchuk, V. V., Kazyv, S. S., Bykovsky, S. A., Wójcik, W., Kotyra, A., Akhmetova, A., ... & Weryńska-Bieniasz, R. "Discrete wavelet transformation in spectral analysis of vibration processes at hydropower units", *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 93(5), pp. 65-68, 2017.
11. Portenko M.S., Melnichuk D.V., Andreichenko D.K., "Analyticity conditions of characteristic and disturbing quasipolynomials of hybrid dynamical systems", *Izv. Saratov Univ. Math. Mech. Inform.*, vol. 16:2, 208–217, 2016.
12. Li, T., Zhu, R., Li, C., & Han, Q. "Fault Diagnosis and of Aero-Engine Hydraulic Pipeline Vibration Signals Based on Hilbert Huang Transforms", *Journal of Aerospace Science and Technology*, vol. 5(1), 37-44, 2017.
13. Zagretdinov A.R., Gaponenko S.O., Serov V.V. "The concept of assessing the technical condition of equipment based on HHT-conversion of vibroacoustic signals", *Engineering journal of Don*, vol. 3, 2015.
14. Ompokov V.D., Boronoyev V.V. "Mode decomposition and the Hilbert-Huang transform", All-Russian open scientific conference "Propagation of radio waves", vol. 1, pp. 499-501, 2019.
15. Meleschenya, D. V., Brantsevich P. Yu. "Application of the Gilbert-Huang transformation in computer vibration monitoring" International Scientific Conference "Monitoring of technogenic and natural objects", Minsk, BSUIR, pp. 93-99, 2017.
16. Hasan, M. J., & Kim, J. M. "Bearing fault diagnosis under variable rotational speeds using stockwell transform-based vibration imaging and transfer learning" *Applied Sciences*, vol. 8(12), 2357, 2018.
17. Gaponenko S.O. "Hardware and software complex based on theoretical modeling and experimental study of the dependence of the entropic vibroacoustic parameters of linear-extended energy objects on their technical state", XIV International Youth Scientific Conference "Tinchurin's readings", Kazan, pp.3-6, 2019.
18. Chernov A.V., Abidova E.A., Khagai L.S. "Diagnostics of leaks in the gate of electric actuator valves by entropy indicators of sound and ultrasonic signals", *Engineering journal of Don*, vol. 4, 2017.
19. Chumak O.V. "Entropies and fractals in data analysis" Izhevsk Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", Institute of Computer Research, 164 p., 2011.
20. Ompokov V.D., Boronoyev V.V. "Entropy approach in the analysis of vibration and partial discharge signals", V International scientific conference "Mechanical Science and Technology Update" 16-17 March 2021. Omsk, Russia, pp. 308-315, 2021.
21. Leite, G.D.N.P., Cunha, G.T.M., Santos Junior, J.G., Araújo, A.M., Rosas, P. A.C., Stosic, T., & Rosso, O.A. "Alternative fault detection and diagnostic using information theory quantifiers based on vibration time-waveforms from condition monitoring systems", Application to operational wind turbines. *Renewable Energy*, 164, 1183-1194, 2021.
22. Yang, Q., Ruan, J., Zhuang, Z., & Huang, D. "Chaotic analysis and feature extraction of vibration signals from power circuit breakers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35(3), 1124-1135, 2019.
23. Jeon, G., & Chehri, A. Entropy-based algorithms for signal processing, 2020.
24. Camarena-Martinez, D., Valtierra-Rodriguez, M., Amezquita-Sanchez, J. P., Granados-Lieberman, D., Romero-Troncoso, R. J., & Garcia-Perez, A. "Shannon Entropy and-Means Method for Automatic Diagnosis of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using Vibration Signals", *Shock and Vibration*, 2016.
25. Deák, K., Mankovits, T., & Kocsis, I. "Optimal Wavelet Selection for the Size Estimation of Manufacturing Defects of Tapered Roller Bearings with Vibration Measurement using Shannon Entropy Criteria", *Strojniski Vestnik. Journal of Mechanical Engineering*, vol. 63(1), 2017.
26. Leite, G. D. N. P., Araújo, A. M., Rosas, P. A. C., Stosic, T., & Stosic, B. "Entropy measures for early detection of bearing faults", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 514, pp. 458-472, 2019.
27. Amezquita-Sanchez, J. P. "Entropy algorithms for detecting incipient damage in high-rise buildings subjected to dynamic vibrations", *Journal of Vibration and Control*, vol. 27(3-4), pp. 426-436, 2021.
28. Yang, Q., Ruan, J., Zhuang, Z., & Huang, D. "Chaotic analysis and feature extraction of vibration signals from power circuit breakers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35(3), pp. 1124-1135, 2019.
29. Ai, Y. T., Guan, J. Y., Fei, C. W., Tian, J., & Zhang, F. L. "Fusion information entropy method of rolling bearing fault diagnosis based on n-dimensional characteristic parameter distance", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 88, pp. 123-136, 2017.

30. Deng, W., Zhang, S., Zhao, H., & Yang, X. "A novel fault diagnosis method based on integrating empirical wavelet transform and fuzzy entropy for motor bearing", IEEE Access, vol. 6, pp. 35042-35056, 2018.

Authors of the publication

Sergey O. Gaponenko - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Aleksandr E. Kondratiev - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Marina V. Kalinina – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Anna A. Derbeneva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Литература

1. Gaponenko S.O., Kondratiev A.E. Nazarychev S.A. "Determination of informative frequency ranges for buried pipeline location control" Helix, vol. 8(1), 2018, pp. 2481-2487.

2. Zakharova V.E., Gaponenko, S.O., Kondratiev, A.E. "Mathematical modeling of low-frequency diagnostic vibration-acoustic vibrations of linear-extended energy objects of housing and communal services" E3S Web of Conferences, RSES 2020, 2020.

3. Shakurova, R.Z., Gaponenko, S.O., Kondratiev, A.E. "On the issue of inertial excitation of diagnostic low-frequency vibrations in pipelines of housing and communal services", E3S Web of Conferences, RSES 2020, 2020.

4. Kondratiev A.E., Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., Nazarychev S.A. "Acoustic-resonance method for control of the location of hidden hollow objects", IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, 2019.

5. Kondratiev A.E., Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., Nazarychev S.A. "Information-measuring system for monitoring the location of underground gas pipelines on the basis of improved acoustic resonance method", IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, 2019.

6. Rabiner L., Gold B. "Theory and Application of Digital Signal Processing" Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J. (1975) 762

7. Uljanova Ju.E., Babenko R.G., Chernov A.V. "The Time-And-Frequency Transformations Used in Digital Processing of Signals", Global Nuclear Safety, vol. 3(16), pp.36-42, 2015.

8. Elizarov A.A. "Implementation of fast Fourier transform algorithms", Information and control systems in transport and industry, pp.196-204, 2018.

9. Wang, Y., Zheng, L., Gao, Y., & Li, S. "Vibration Signal Extraction Based on FFT and Least Square Method", IEEE Access, vol. 8, 224092-224107, 2020.

10. Kukharchuk, V. V., Kazyv, S. S., Bykovsky, S. A., Wójcik, W., Kotyra, A., Akhmetova, A., ... & Weryńska-Bieniasz, R. "Discrete wavelet transformation in spectral analysis of vibration processes at hydropower units", Przegląd Elektrotechniczny, vol. 93(5), pp. 65-68, 2017.

11. Portenko M.S., Melnichuk D.V., Andreichenko D.K., "Analyticity conditions of characteristic and disturbing quasipolynomials of hybrid dynamical systems", Izv. Saratov Univ. Math. Mech. Inform., vol. 16:2, 208–217, 2016.

12. Li, T., Zhu, R., Li, C., & Han, Q. "Fault Diagnosis and of Aero-Engine Hydraulic Pipeline Vibration Signals Based on Hilbert Huang Transforms", Journal of Aerospace Science and Technology, vol. 5(1), 37-44, 2017.

13. Zagretdinov A.R., Gaponenko S.O., Serov V.V. "The concept of assessing the technical condition of equipment based on HHT-conversion of vibroacoustic signals", Engineering journal of Don, vol. 3, 2015.

14. Ompokov V.D., Boronoyev V.V. "Mode decomposition and the Hilbert-Huang transform", All-Russian open scientific conference "Propagation of radio waves", vol. 1, pp. 499-501, 2019.
15. Meleschenya, D. V., Brantsevich P. Yu. "Application of the Gilbert-Huang transformation in computer vibration monitoring" International Scientific Conference "Monitoring of technogenic and natural objects", Minsk, BSUIR, pp. 93-99, 2017.
16. Hasan, M. J., & Kim, J. M. "Bearing fault diagnosis under variable rotational speeds using stockwell transform-based vibration imaging and transfer learning" Applied Sciences, vol. 8(12), 2357, 2018.
17. Gaponenko S.O. "Hardware and software complex based on theoretical modeling and experimental study of the dependence of the entropic vibroacoustic parameters of linear-extended energy objects on their technical state", XIV International Youth Scientific Conference "Tinchurin's readings", Kazan, pp.3-6, 2019.
18. Chernov A.V., Abidova E.A., Khegai L.S. "Diagnostics of leaks in the gate of electric actuator valves by entropy indicators of sound and ultrasonic signals", Engineering journal of Don, vol. 4, 2017.
19. Chumak O.V. "Entropies and fractals in data analysis" Izhevsk Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", Institute of Computer Research, 164 p., 2011.
20. Ompokov V.D., Boronoyev V.V. "Entropy approach in the analysis of vibration and partial discharge signals", V International scientific conference "Mechanical Science and Technology Update" 16-17 March 2021. Omsk, Russia, pp. 308-315, 2021.
21. Leite, G.D.N.P., Cunha, G.T.M., Santos Junior, J.G., Araújo, A.M., Rosas, P. A.C., Stosic, T., & Rosso, O.A. "Alternative fault detection and diagnostic using information theory quantifiers based on vibration time-waveforms from condition monitoring systems", Application to operational wind turbines. Renewable Energy, 164, 1183-1194, 2021.
22. Yang, Q., Ruan, J., Zhuang, Z., & Huang, D. "Chaotic analysis and feature extraction of vibration signals from power circuit breakers", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 35(3), 1124-1135, 2019.
23. Jeon, G., & Chehri, A. Entropy-based algorithms for signal processing, 2020.
24. Camarena-Martinez, D., Valtierra-Rodriguez, M., Amezcua-Sanchez, J. P., Granados-Lieberman, D., Romero-Troncoso, R. J., & Garcia-Perez, A. "Shannon Entropy and-Means Method for Automatic Diagnosis of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using Vibration Signals", Shock and Vibration, 2016.
25. Deák, K., Mankovits, T., & Kocsis, I. "Optimal Wavelet Selection for the Size Estimation of Manufacturing Defects of Tapered Roller Bearings with Vibration Measurement using Shannon Entropy Criteria", Strojnicki Vestnik. Journal of Mechanical Engineering, vol. 63(1), 2017.
26. Leite, G. D. N. P., Araújo, A. M., Rosas, P. A. C., Stosic, T., & Stosic, B. "Entropy measures for early detection of bearing faults", Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. 514, pp. 458-472, 2019.
27. Amezcua-Sanchez, J. P. "Entropy algorithms for detecting incipient damage in high-rise buildings subjected to dynamic vibrations", Journal of Vibration and Control, vol. 27(3-4), pp. 426-436, 2021.
28. Yang, Q., Ruan, J., Zhuang, Z., & Huang, D. "Chaotic analysis and feature extraction of vibration signals from power circuit breakers", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 35(3), pp. 1124-1135, 2019.
29. Ai, Y. T., Guan, J. Y., Fei, C. W., Tian, J., & Zhang, F. L. "Fusion information entropy method of rolling bearing fault diagnosis based on n-dimensional characteristic parameter distance", Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 88, pp. 123-136, 2017.
30. Deng, W., Zhang, S., Zhao, H., & Yang, X. "A novel fault diagnosis method based on integrating empirical wavelet transform and fuzzy entropy for motor bearing", IEEE Access, vol. 6, pp. 35042-35056, 2018.

Авторы публикации:

Гапоненко Сергей Олегович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная

теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета.

Кондратьев Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета.

Калинина Марина Владимировна – ассистент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета.

Дербенева Анна Александровна – канд. эконом. наук, доцент кафедры «Экономика и организация производства» (ЭОП) Казанского государственного энергетического университета.

Шифр научной специальности: 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы»

Получено **20.11.2023 г.**

Отредактировано **11.01.2024 г.**

Принято **12.02.2024 г.**



МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВОЙНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Крюков^{1,2} А.В., Овечкин¹ И.С., Суслов^{2,3} К.В.

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

² Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

³ Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>, and_kryukov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4639-1504>, iliaov2015@mail.ru

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

Резюме: ЦЕЛЬ. Разработка цифровых моделей для определения режимов двойных замыканий на землю (ДЗЗ) в воздушных линиях 6-10 кВ, питающих объекты сигнализации, централизации и автоблокировки (ВЛ СЦБ). МЕТОДЫ. Для создания моделей использовались методы мультифазного моделирования электроэнергетических систем. РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработанные модели обеспечивают корректный учет факторов, влияющих на режимы ДЗЗ, включая трехфазно-однофазную структуру рассматриваемой системы электроснабжения и повышенные электромагнитные влияния тяговой сети. В отличие от известных подходов осуществляется моделирование динамики изменений этих влияний, вызванных вариациями тяговых нагрузок при движении поездов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предложенный подход к определению режимов ДЗЗ является универсальным и может применяться для типовых систем электроснабжения, а также перспективных тяговых сетей повышенного напряжения. Полученные результаты могут быть использованы на практике для настройки устройств релейной защиты ВЛ СЦБ с целью обнаружения ДЗЗ и принятия мер по их устранению. Кроме того, представленная в статье методика моделирования может быть полезной при выборе мероприятий по повышению надежности электроснабжения объектов СЦБ, обеспечивающих безопасность движения поездов, а также для разработки методов и алгоритмов локализации двойных замыканий на землю в воздушных линиях электропередачи, питающих объекты сигнализации, централизации и автоблокировки.

Ключевые слова: двойные замыкания на землю; воздушные линии автоблокировки; электромагнитные влияния тяговых сетей; моделирование.

Благодарности: Работа, по результатам которой подготовлена статья, выполнена в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока».

Для цитирования: Крюков А.В., Овечкин И.С., Суслов К.В. Моделирование режимов двойных замыканий на землю в системах электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 138-148. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-138-148.

MODELING OF DOUBLE GROUND FAULT MODES IN POWER SUPPLY SYSTEMS OF NON-TRACTION CONSUMERS OF RAILWAY TRANSPORT

Kryukov^{1,2} A.V., Ovechkin¹ I.S., Suslov^{2,3} K.V.

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

³ National Research University "MEI", Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>, and kryukov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4639-1504>, iliaov2015@mail.ru

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

Abstract: *THE PURPOSE.* Development of digital models to determine the modes of double ground faults in 6-10 kV overhead signaling lines supplying signaling, centralization and automatic blocking facilities. *METHODS.* To create the models, methods of multiphase modeling of electric power systems were used, based on the use of lattice equivalent circuits from RLC-elements connected according to complete graph circuits. For modeling, the industrial software package Fazonord, developed at the Irkutsk State Transport University, was used. *RESULTS.* The developed models provide correct accounting of all factors influencing the modes of double ground faults, including increased electromagnetic influences of the traction network. In contrast to known approaches, the dynamics of changes in these influences caused by variations in traction loads during train movement are modeled. *CONCLUSION.* The proposed approach to modeling double ground fault modes is universal and can be used for standard traction power supply systems, as well as promising high-voltage traction networks. The results obtained can be used in practice to configure relay protection devices for overhead signaling lines in order to reliably detect double ground fault modes and take measures to eliminate them. In addition, the modeling methodology presented in the article can be used when selecting measures to improve the reliability of power supply to signaling and automatic blocking facilities that ensure the safety of train traffic, as well as to develop methods and algorithms for determining distances to places of double ground faults in overhead power lines feeding signaling facilities, centralization and auto-blocking. The presented results confirmed the effectiveness of the proposed approach for modeling double ground fault modes.

Keywords: double ground faults; overhead signaling lines; electromagnetic influences of traction networks; modeling.

For citation: Kryukov A.V., Ovechkin I.S., Suslov K.V. Modeling of double ground fault modes in power supply systems of non-traction consumers of railway transport. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (2): 138-148. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-138-148.

Введение (Introduction)

Вдоль трасс магистральных железных дорог (ЖД) расположены объекты сигнализации, централизации и автоблокировки, обеспечивающие безопасность движения поездов. По степени надежности электроснабжения большая часть из них относится к потребителям первой категории, а также ее особой группы. Для их подключения сооружаются специальные линии электропередачи напряжением 6-10 кВ. Основное питание осуществляется от воздушных линий (ВЛ СЦБ), проложенных параллельно трассе дороги. Для резервирования используются ЛЭП продольного электроснабжения, расположенные на опорах контактной сети. В целях снижения влияний на рельсовые цепи железнодорожной автоматики ВЛ СЦБ подключается к шинам собственных нужд через повышающие трансформаторы 6-10/0,4 кВ с соединением обмоток звезда с нулевым выводом – треугольник. Для корректного моделирования режимов таких ЛЭП требуется учитывать целый ряд факторов, существенно усложняющих решение этой задачи. К ним можно отнести следующие аспекты:

- трехфазно-однофазную структуру системы электроснабжения;
- резкопеременную динамику и перемещение тяговых нагрузок в пространстве;
- электромагнитные влияния тяговой сети на ВЛ СЦБ и др.

В процессе эксплуатации ВЛ СЦБ могут возникать двойные замыкания на землю (ДЗЗ) [1–3], которые являются, как правило, результатом развития однофазных замыканий (ОЗЗ). Эти повреждения не относятся к категории аварийных и не отключаются релейной

защитой. При появлении ОЗЗ напряжения неповрежденных фаз относительно земли возрастают до линейных значений, что способствует возникновению замыканий в других точках сети, часто удаленных от места первичного ОЗЗ на несколько десятков километров (рис. 1).

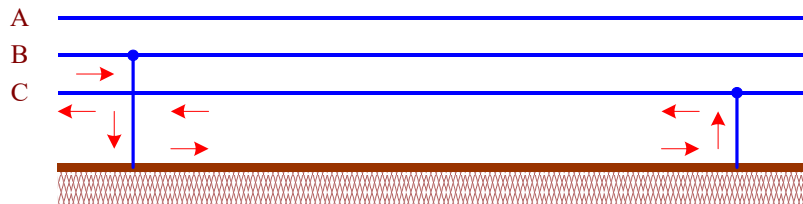


Рис. 1. Схема режима ДЗЗ

Fig. 1. Diagram of double earth faults

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Вопросам изучения ДЗЗ посвящен целый ряд работ, часть из которых представлена в библиографическом списке к данной статье. Значительное число публикаций по ДЗЗ посвящено решению сложной задачи [4] определения мест их возникновения. Так, например, в работах [5–7] для ее решения применяется фиксирующий орган сопротивления ЛЭП. В статьях [8–10] для определения мест ДЗЗ используются методы, основанные на алгоритмических моделях и энергетическом критерии. В [11] описан способ локализации двойных замыканий на землю. Эффективные алгоритмы и итерационные процедуры для нахождения мест ДЗЗ предложены в [12–16]. Вопросы моделирования работоспособности электрооборудования электрических сетей рассмотрены в [17, 18]. Новый метод обнаружения ДЗЗ представлен в [19]. Подход к фиксации ДЗЗ, основанный на применении гибридного профиля тока, предложен в [20]. Опыт поиска ДЗЗ в компенсированных сетях с использованием технологии бегущей волны описан в [21].

Отдельным, но важным аспектам режимов ДЗЗ, посвящены работы [22–25]. Результаты анализа режимов ДЗЗ с использованием реальных данных осциллографии приведены в [22]. Вопросы защиты от замыканий на землю рассмотрены в [23]. Способ повышения эффективности функционирования сетей 6–10 кВ, основанный на автоматическом переводе двойных замыканий на землю в ОЗЗ, предложен в [24]. Задача определения термической стойкости металлических оболочек кабелей при ДЗЗ в сетях среднего напряжения решена в [25].

Анализ представленных выше публикаций показывает, что несмотря на большое число работ, посвященных ДЗЗ, задачи моделирования таких режимов в линиях 6–10 кВ, работающих в составе систем электроснабжения железных дорог и расположенных в зонах повышенных электромагнитных влияний тяговых сетей, остаются не решёнными. По мнению авторов, это связано с тем, что для определения режимов ДЗЗ в большинстве из проанализированных выше источников используется метод симметричных составляющих, применение которого для моделирования сложных трехфазно-однофазных сетей с многократными продольно-поперечными несимметриями приводит к значительным методическим и алгоритмическим затруднениям. Наиболее эффективный путь их преодоления состоит в применении фазных координат [26].

Ниже представлены результаты моделирования и анализа режимов ДЗЗ в системах электроснабжения железных дорог. Цель исследований состояла в разработке цифровых моделей для определения ДЗЗ в воздушных линиях 6–10 кВ, питающих объекты сигнализации, централизации и автоблокировки. Научная новизна полученных результатов определяется тем, что предложенные модели позволяют корректно учитывать трехфазно-однофазную структуру систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД) и повышенные электромагнитные влияния тяговой сети. Полученные результаты могут быть использованы на практике для настройки устройств релейной защиты ВЛ СЦБ, разработки методов и алгоритмов определения расстояний до мест ДЗЗ, а также при выборе мероприятий по повышению надежности электроснабжения объектов СЦБ.

Материалы и результаты (Materials and results)

Для моделирования режимов ДЗЗ использовались методы мультифазного представления электроэнергетических систем (ЭЭС), предложенные в работе [26] и реализованные в программном комплексе (ПК) Fazonord. На их основе возможно определение режимов ЭЭС и СЭЖД на основной частоте и частотах высших гармоник. При расчетах СЭЖД тяговые нагрузки формируются на основе имитационного моделирования движения поездов по магистрали с реальным профилем пути. Кроме вычисления уровней напряжения в узловых точках сети и потоков мощности по ее ветвям возможно определение показателей качества электроэнергии по несимметрии и гармоническим искажениям.

Расчеты режимов двойных замыканий на землю в ВЛ СЦБ осуществлялись для схемы СЭЖД, показанной на рисунке 2. В модели, реализованной в ПК Fazonord, были учтены следующие элементы сети: питающие ЛЭП 110 кВ; силовые трансформаторы; участок тяговой сети (ТС) протяженностью 50 км, включающий контактные подвески, рельсовые нити и линию ВЛ СЦБ напряжением 6 кВ, которая была расположена параллельно трассе ЖД и смонтирована на железобетонных опорах. Тяговые нагрузки создавались движением поездов массой 3192 и 4192 т. При моделировании ДЗЗ учитывалось сопротивление самозаземления опор ВЛ СЦБ, принятое равным 15 Ом [27].

Рассматривалось замыкание на землю фаз В и С. Для возможности варьирования мест ДЗЗ модель ТС, включающая линию ВЛ СЦБ, была разбита на участки протяженностью в десять километров. Координаты x точек замыкания на землю задавались в двух вариантах: в первом – величина x для фазы В принималась фиксированной и равной нулю, а для фазы С варьировалась в диапазоне 0...50 км с шагом в десять километров; во втором – значение x для фазы В задавалось равным 50 км, а координата x для фазы С изменялась в таком же диапазоне. Результаты моделирования представлены на рис. 3–6. В качестве примера на рисунке 3 проиллюстрирована динамика изменений параметров режима в узлах ВЛ СЦБ, при следующих местах ДЗЗ: фаз В при $x=0$ км и фаз С в точке $x=50$ км.

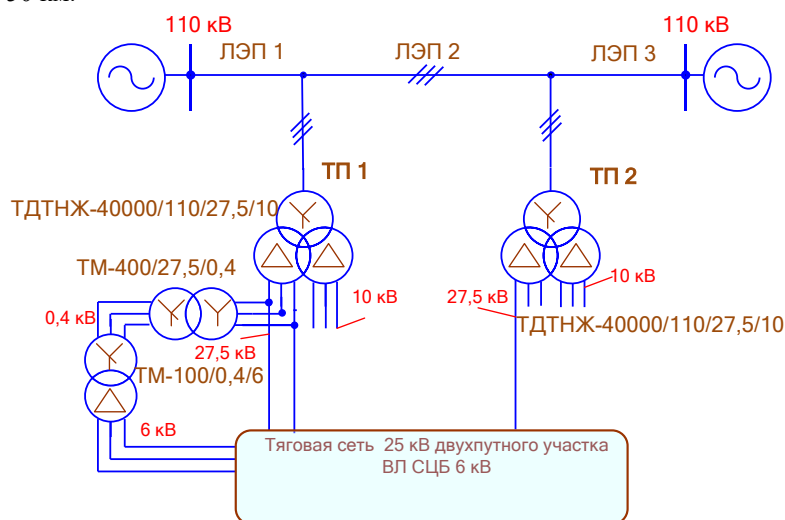


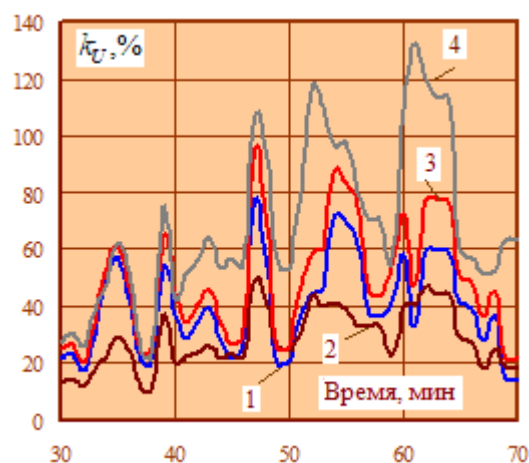
Рис. 2. Схема системы электроснабжения

Fig. 2. Schematic diagram of the power supply system

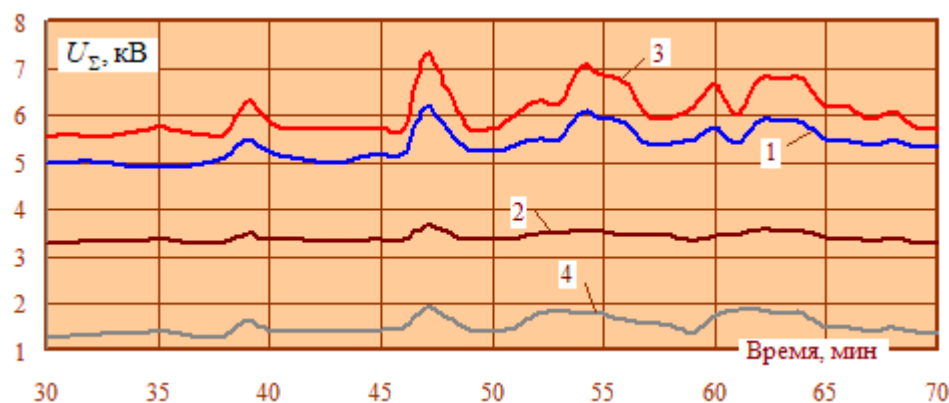
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



а)



б)



в)

Рис. 3. Напряжения основной частоты (а), коэффициенты гармоник (б) и эффективные напряжения с учетом ВГ (в): 1, 3 – неповрежденной фазы А при $x = 0$ и 50 км, 2 – фазы С при $x = 0$ км, 4 – фазы В при $x = 50$ км; $U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + (k_U / 100)^2}$; k_U – суммарный коэффициент гармоник напряжения

Fig. 3. Main frequency voltages (a), harmonic coefficients (b) and effective voltages taking into account HV (c): 1, 3 - intact phase A at $x = 0$ and 50 km, 2 - phase C at $x = 0$ km, 4 - phase B at $x = 50$ km; $U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + (k_U / 100)^2}$ k_U - total voltage harmonic coefficient

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из рисунке 3 видно, что влияние резкопеременной и нелинейной тяговой нагрузки приводит к вариациям параметров, характеризующих ДЗЗ ВЛ СЦБ: напряжений основной частоты, коэффициентов гармоник и эффективных напряжений U_{Σ} . По сравнению с исходным режимом напряжения U_1 и U_{Σ} здоровой фазы А увеличивается на 30...40 %, а поврежденных фаз В и С уменьшается на 60 и 5 % соответственно. Особенно заметно изменяются U_{Σ} , фазы А и коэффициенты гармоник. Этот фактор необходимо учитывать при проектировании устройств защиты от ДЗЗ и разработке алгоритмов определения мест их возникновения.

На рисунке 4 представлена динамика изменений токов ДЗЗ, стекающих в землю, при замыкании фазы В при $x = 0$ и фазы С при $x = 50$ км. Из него видно, что токи фаз В и С практически не различаются.

Формы кривых напряжений U_{Σ} и тока I_{Σ} фазы В для первого варианта моделирования приведены на рисунке 5. Он соответствует замыканию этой фазы в точке с координатой $x = 0$ и показывает, что графики $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(t)$ заметно отличаются от синусоиды. Степень искажения зависимости $I_{\Sigma} = I_{\Sigma}(t)$ существенно меньше, что объясняется относительно небольшими значениями коэффициентов гармоник k_I : для фазы В его максимальное значение равно 8,5 %, а для фазы С – 8,4 %.

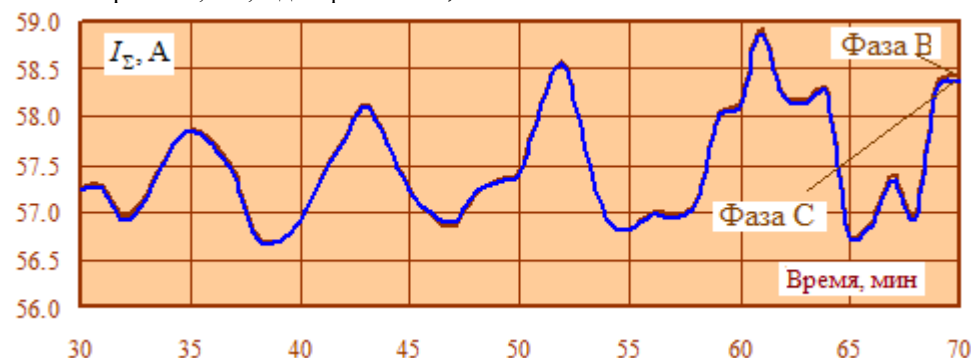


Рис. 4. Сравнение эффективных токов ДЗЗ:

Fig. 4. Comparison of effective double earth fault

currents : $I_{\Sigma} = I_1 \sqrt{1 + (k_I / 100)^2}$; k_I – суммарный коэффициент гармоник тока

$I_{\Sigma} = I_1 \sqrt{1 + (k_I / 100)^2}$ k_I ; - total current harmonic coefficient

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

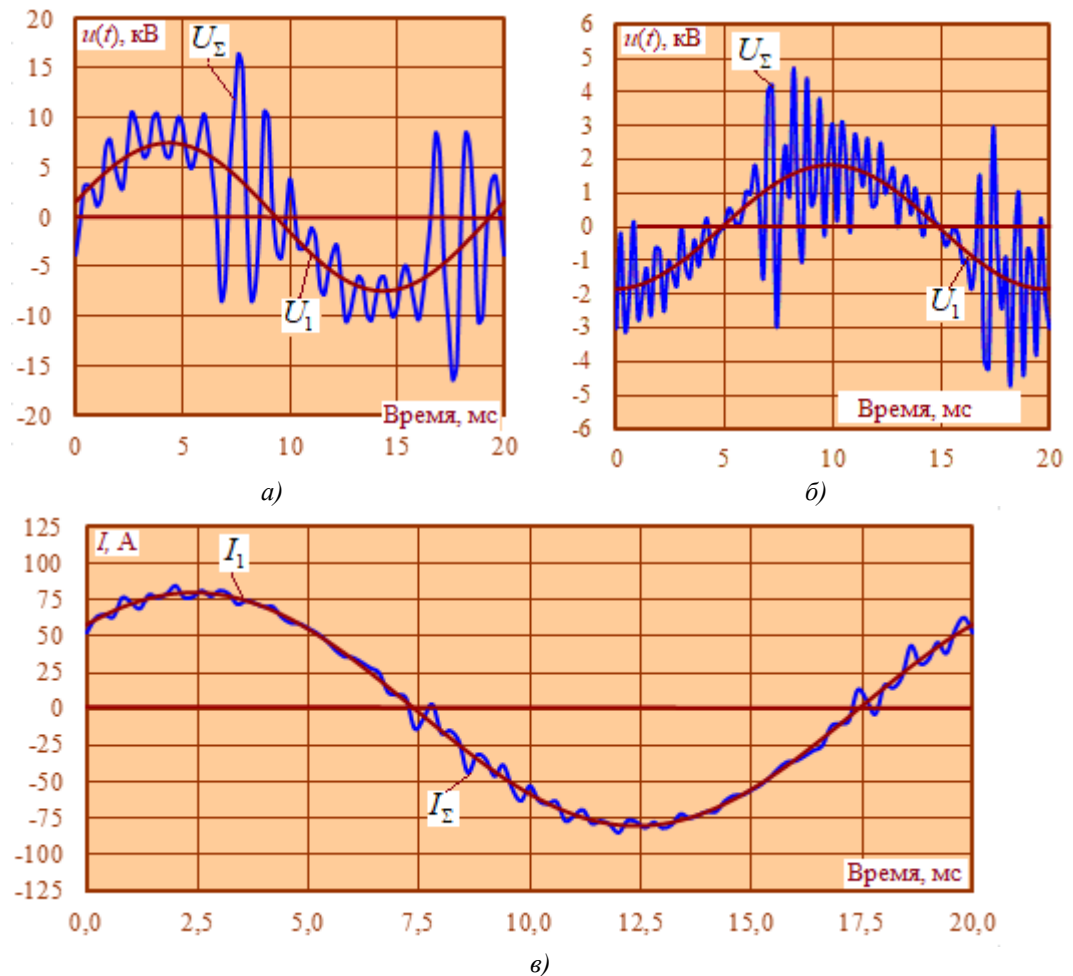


Рис. 5. Формы кривых напряжений фаз А (а) и С (б), а также токов замыкания фазы В (в) в узлах, отвечающих координате $x = 0$ км, на 47-й минуте моделирования

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 6 представлены зависимости тока фазы С от координаты x , при фиксированном замыкании фазы В при $x = 0$ км (рис. 6, а) и $x = 50$ км (рис. 6, б). Из этих рисунков видно, что с увеличением расстояния между точками замыканий токи уменьшаются.

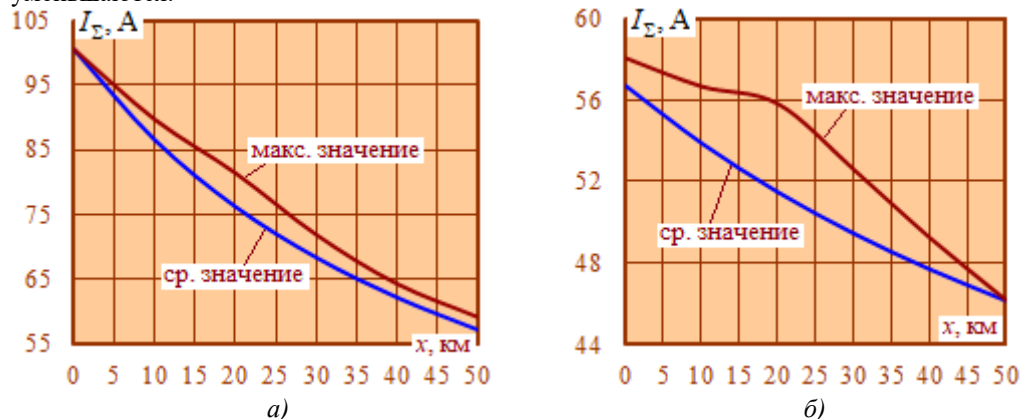


Рис. 6. Зависимости тока замыкания фазы С от координаты x : а – при фиксированном замыкании фазы В в точке отвечающей $x = 0$; б – при фиксированном замыкании фазы В в точке отвечающей $x = 50$ км

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Зависимость максимальных значений тока от координаты x для первого варианта расчетов близка к линейной. Аналогичным свойством обладает график средних значений от x для второго варианта. На рисунке 7 показана динамика изменений коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательностям. Кривые соответствуют замыканию фазы В при $x = 10$ км и фазы С в точке $x = 20$ км.

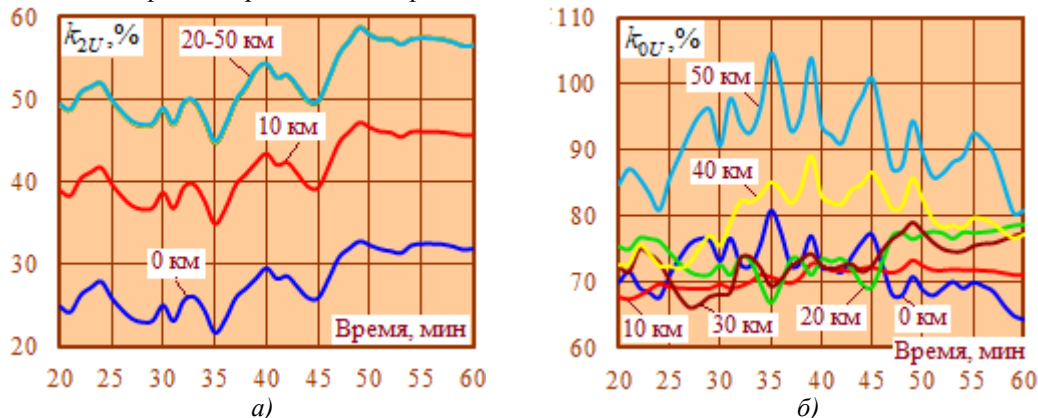


Рис. 7. Зависимости коэффициентов несимметрии напряжения по обратной (а) и нулевой (б) последовательностям от времени

Fig. 7. Time dependences of voltage asymmetry coefficients in reverse (a) and zero (b) sequences

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из рисунка 7 видно, что с увеличением расстояния от ТП1 коэффициент несимметрии по обратной последовательности возрастает до 58 % (47 минута), а начиная с 20 км и до конца линии (50 км), не изменяется. На рис. 8 представлены зависимости коэффициентов несимметрии от координаты x .

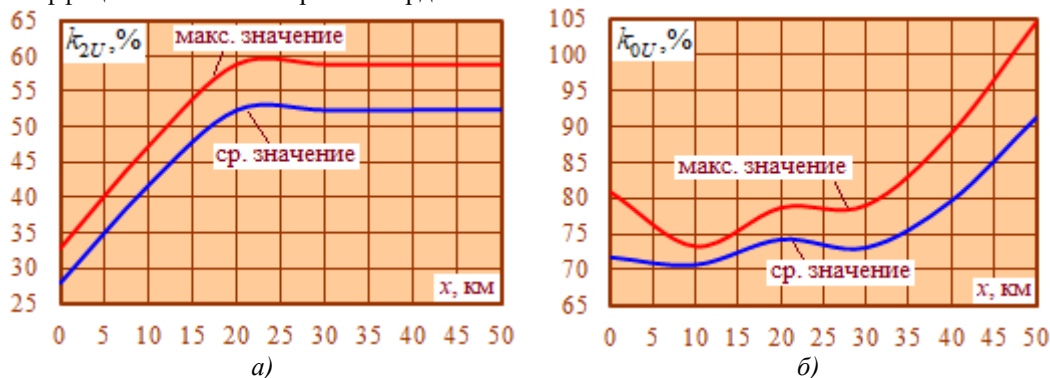


Рис. 8. Зависимости коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям от координаты x при замыкании фазы В в точке, отвечающей $x = 10$ км, а фазы С – в точке $x = 20$ км

Fig. 8. Dependences of the voltage asymmetry coefficients in reverse and zero sequences on the coordinate x when phase В is shorted at the point corresponding to $x = 10$ km, and phase С - at the point $x = 20$ km

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Представленные на рисунке 8 графики показывают, что при ДЗЗ возникают существенные уровни несимметрии, особенно по нулевой последовательности (105 % при $x = 50$ км). При этом k_{2U} имеет экстремум (60 %) при $x = 23$ км от ТП1.

Закключение (Conclusions)

Разработаны цифровые модели для определения токов и напряжений при двойных замыканиях на землю в системах электроснабжения железных дорог, обеспечивающие корректный учет всех основных факторов, влияющих на режимы ДЗЗ, включая трехфазно-однофазную структуру СЭЖД и повышенные электромагнитные влияния тяговой сети. В отличие от известных подходов осуществляется моделирование динамики изменений этих влияний, вызванных вариациями тяговых нагрузок при движении поездов. Предложенный подход является универсальным и может применяться как для типовых систем электроснабжения, так и для перспективных тяговых сетей повышенного напряжения. Полученные результаты могут быть использованы на практике для настройки устройств релейной защиты ВЛ СЦБ с целью обнаружения режимов ДЗЗ и принятия мер по их устранению. Представленная методика может применяться при выборе мероприятий по

повышению надежности электроснабжения объектов СЦБ, обеспечивающих безопасность движения поездов, а также для разработки методов и алгоритмов определения расстояний до мест двойных замыканий на землю в воздушных линиях электропередачи.

Литература

1. Спиричев М. А., Попов Н. М., Олин Д. М. О необходимости отключать двойные замыкания на землю без выдержки времени // Вестник КрасГАУ. № 4 (139). 2018. С. 133-137.
2. Koepl G. S., Braun D., Lakner M. Double Earth Faults in Power Stations // IEEE Transactions on Power Delivery. 2015. Vol.30, Issue: 3.
3. Олин Д. М., Спиричев М. А. Устройства для защиты воздушных линий 6-35 кВ от двойных замыканий на землю // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе. Караваево, 2017. С. 233-238.
4. Zhang Y., Zhang Q., Song W., Yu Y., Li X. Transmission line fault location for double phase-to-earth fault on non-direct-ground neutral system // IEEE Transactions on Power Delivery. 2000. Vol.15, Issue: 2..
5. Хахимзянов Э. Ф., Мустафин Р. Г., Федотов А. И. Определение расстояний до мест двойных замыканий на землю на линии электропередачи распределительной сети среднего напряжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. № 3-4. 2015. С. 132-137.
6. Определение поврежденного участка распределительной сети в режиме "двойное замыкание на землю" / Э. Ф. Хахимзянов, А. И. Федотов, Р. Г. Мустафин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. № 7-8. 2016. С. 3-8.
7. Хахимзянов Э. Ф., Куксов С. В. Определение мест повреждений в распределительных сетях среднего напряжения при двойных замыканиях на землю // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике. Казань, 2017. С. 21-26.
8. Определение мест двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью / М.В. Убасева, В.С. Петров, В. А. Наумов [и др.] // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Чебоксары, 2020. С. 407-413.
9. Определение мест двойного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью // М. В. Убасева, В. С. Петров, В. А. Наумов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. № 4 (45). 2021. С. 40-46.
10. Ubaseva M., Petrov V., Antonov V. The Novel Method for Determining Locations of a Double Ground Fault in Networks with Isolated Neutra // Proc. of 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2020.
11. Белянин А. А. Определение мест двойных замыканий на землю методом локализации // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. № 7. 2017. С. 52-56.
12. Способы определения расстояний до мест двойных замыканий на землю // А.Л. Куликов, В. Ю. Осокин, М. Д. Обалин, [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики. Нижний Новгород, 2018. С. 196-201.
13. Применение имитационного моделирования ЛЭП 6-35 кВ для повышения точности определения расстояния до двойных замыканий на землю / А. Л. Куликов, М. Д. Обалин, В. Ю. Осокин [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. № 1. 2018. С. 40-49.
14. Куликов А. Л., Осокин В. Ю., Обалин М. Д. Повышение точности алгоритмов определения места повреждения лэп 6-35 кВ при двойных замыканиях на землю с помощью введения итерационных процедур // Электроэнергия. Передача и распределение. № 1 (52). 2019. С. 78-83.
15. Куликов А. Л., Обалин М. Д., Осокин В. Ю. Сокращение времени восстановления поврежденной линии электропередачи 6-35 кВ при двойных замыканиях на землю с применением итерационных процедур определения места повреждения // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Иркутск, 2018. С. 106-115.
16. Kulikov A. L., Osokin V. Ju., Obalin M. D. Improving Accuracy the Fault Location on Transmission Line 6–35 kV for Double Earth Fault // Proc. of 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2018
17. Грачева Е.И., Тошходжаева М.И. Моделирование работоспособности электрооборудования систем электроснабжения и электрических сетей - Казань, 2021.
18. Юсупова А.А., Грачева Е.И. Повышение эффективности и надежности эксплуатации кабельных линий // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве. Сборник материалов III Поволжской научно-практической конференции, 2017. С. 180-181.
19. Zheng R., Lin X., Zhao F., Bo Z. A novel single-ended fault location method for locating double-phase to earth faults // Proc. of 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011.

20. Dubey A., Sun H., Nikovski D., Takano T., Kojima Y., Ohno T. Locating double-line-to-ground faults using hybrid current profile approach. Proc. of 2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). 2015 Publisher: IEEE.
21. Dzienis C., Leitner W., Eberhardt H.. Experiences with Double- and Single-Ended Fault Location in Compensated Network Applying Travelling Wave Technology // Proc. of 2019 Modern Electric Power Systems (MEPS). 2019. Publisher: IEEE.
22. Heringer W. R., Cordeiro M. A. M., Paye J. C. H., Sousa A. L., Leão A. P., Vieira J. P. A., Santos M. C., Cardoso G., de Moraes A. P., Wontroba A., Farias P. E. Reproduction of a High Impedance Double line-to-ground Fault Using Real Oscillography Data // Proc. of 2020 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D LA). 2020.
23. Jia Q., Dong X., Shi S., He X. Non-communication Protection for Single-Phase-to-Ground Fault Feeder in Neutral Non-Effectively Grounded Distribution System // Proc. of 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). 2018.
24. Качанов А. Н., Чернышов В. А., Королева Т. Г. Автоматический перевод двойных замыканий на землю в однофазные как способ повышения эффективности функционирования сетей 6-10 кВ // Электрические сети: надежность, безопасность, энергосбережение и экономические аспекты. Казань, 2023. С. 23-30.
25. Budahs M., Rozenkrons J., Staltmanis A.. Thermal stability of cables metallic covers in the case of double earth faults in middle voltage networks // Proc. of 2005 IEEE Russia Power Tech. 2005.
26. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
27. Обеспечение чувствительности дистанционных защит фидеров контактной сети переменного тока на участках с разземленными опорами / И. А. Кремлев, Ю. В. Кондратьев, В. А. Кващук [и др.] // Фундаментальные исследования. № 6-3. 2014. С. 472-475.

Авторы публикации

Крюков Андрей Васильевич – д-р. техн. наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета.

Овечкин Илья Сергеевич – аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения.

Суслов Константин Витальевич – д-р. техн. наук, доцент, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва; профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ).

References

1. Spirichev M. A., Popov N. M., Olin D. M. On the need to disconnect double ground faults without a time delay // Bulletin of KrasGAU. No. 4 (139). 2018. pp. 133-137.
2. Koepl G. S., Braun D., Lakner M. Double Earth Faults in Power Stations // IEEE Transactions on Power Delivery. 2015. Vol.30, Issue: 3.
3. Olin D. M., Spirichev M. A. Devices for protecting 6-35 kV overhead lines from double ground faults // Current problems of science in the agro-industrial complex. Karavaevo, 2017. pp. 233-238.
4. Zhang Y., Zhang Q., Song W., Yu Y., Li X. Transmission line fault location for double phase-to-earth fault on non-direct-ground neutral system // IEEE Transactions on Power Delivery. 2000. Vol.15, Issue: 2.
5. Khakimzyanov E.F., Mustafin R.G., Fedotov A.I. Determination of distances to places of double ground faults on the power line of a medium voltage distribution network // News of higher educational institutions. Energy problems. No. 3-4. 2015. pp. 132-137.
6. Determination of the damaged section of the distribution network in the “double ground fault” mode / E. F. Khakimzyanov, A. I. Fedotov, R. G. Mustafin [et al.] // News of higher educational institutions. Energy problems. No. 7-8. 2016. pp. 3-8.
7. Khakimzyanov E. F., Kuksov S. V. Determination of fault locations in medium voltage distribution networks during double ground faults // Dispatch and management in the electric power industry. Kazan, 2017. pp. 21-26.
8. Determination of double ground fault locations in a network with an isolated neutral / M.V.

Ubaseva, V.S. Petrov, V. A. Naumov [etc.] // Information technologies in electrical engineering and power engineering. Cheboksary, 2020. pp. 407-413.

9. Determination of double ground fault locations in networks with an isolated neutral // M. V. Ubaseva, V. S. Petrov, V. A. Naumov [etc.] // Relay protection and automation. No. 4 (45). 2021. pp. 40-46.

10. Ubaseva M., Petrov V., Antonov V. The Novel Method for Determining Locations of a Double Ground Fault in Networks with Isolated Neutra // Proc. of 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2020.

11. Belyanin A. A. Determination of locations of double ground faults using the localization method // Electrical equipment: operation and repair. No. 7. 2017. pp. 52-56.

12. Methods for determining distances to places of double ground faults // A.L. Kulikov, V. Yu. Osokin, M. D. Obalin, [etc.] // Current problems of electric power industry. Nizhny Novgorod, 2018. pp. 196-201.

13. Application of simulation modeling of 6-35 kV power lines to improve the accuracy of determining the distance to double ground faults / A. L. Kulikov, M. D. Obalin, V. Yu. Osokin [etc.] // Bulletin of Ivanovo State Energy University . No. 1. 2018. pp. 40-49.

14. Kulikov A. L., Osokin V. Yu., Obalin M. D. Increasing the accuracy of algorithms for determining the location of damage to 6-35 kV power lines during double ground faults by introducing iterative procedures // Electricity. Transmission and distribution. No. 1 (52). 2019. pp. 78-83.

15. Kulikov A. L., Obalin M. D., Osokin V. Yu. Reducing the restoration time of a damaged 6-35 kV power line with double ground faults using iterative procedures for determining the location of the damage // Methodological issues in studying the reliability of large energy systems . Irkutsk, 2018. pp. 106-115.

16. Kulikov A. L., Osokin V. Ju., Obalin M. D. Improving Accuracy the Fault Location on Transmission Line 6–35 kV for Double Earth Fault. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2018

17. Gracheva E.I., Toshkhodzhaeva M.I. Modeling the performance of electrical equipment of power supply systems and electrical networks - Kazan, 2021.

18. Yusupova A.A., Gracheva E.I. Increasing the efficiency and reliability of operation of cable lines. Instrument making and automated electric drive in the fuel and energy complex and housing and communal services. Collection of materials of the III Volga Scientific and Practical Conference, 2017. pp. 180-181.

19. Zheng R., Lin X., Zhao F., Bo Z. A novel single-ended fault location method for locating double-phase to earth faults // Proc. of 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011.

20. Dubey A., Sun H., Nikovski D., Takano T., Kojima Y., Ohno T. Locating double-line-to-ground faults using hybrid current profile approach. Proc. of 2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). 2015 Publisher: IEEE.

21. Dzienis C., Leitner W., Eberhardt H.. Experiences with Double- and Single-Ended Fault Location in Compensated Network Applying Travelling Wave Technology // Proc. of 2019 Modern Electric Power Systems (MEPS). 2019. Publisher: IEEE.

22. Heringer W. R., Cordeiro M. A. M., Paye J. C. H., Sousa A. L., Leão A. P., Vieira J. P. A., Santos M. C., Cardoso G., de Moraes A. P., Wontroba A., Farias P. E. Reproduction of a High Impedance Double line-to-ground Fault Using Real Oscillography Data // Proc. of 2020 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D LA). 2020.

23. Jia Q., Dong X., Shi S., He X. Non-communication Protection for Single-Phase-to-Ground Fault Feeder in Neutral Non-Effectively Grounded Distribution System // Proc. of 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). 2018. 2

4. Kachanov A. N., Chernyshov V. A., Koroleva T. G. Automatic transfer of double ground faults to single-phase ones as a way to increase the efficiency of 6-10 kV networks // Electric networks: reliability, safety, energy saving and economic aspects . Kazan, 2023. pp. 23-30.

25. Budahs M., Rozenkrons J., Staltmanis A.. Thermal stability of cables metallic covers in the case of double earth faults in middle voltage networks // Proc. of 2005 IEEE Russia Power Tech. 2005.

26. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Complex asymmetrical modes of electrical systems. Irkutsk: Irkutsk University, 2005. 273 p.

27. Ensuring the sensitivity of distance protection of AC contact network feeders in areas with ungrounded supports / I. A. Kremlev, Yu. V. Kondratiev, V. A. Kvashchuk [et al.] // Fundamental Research. No. 6-3. 2014. pp. 472-475.

Authors of the publication

Kryukov Andrey Vasilievich - Irkutsk State Transport University Professor, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Ovechkin Ilya Sergeevich – Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia.

Suslov Konstantin Vitalievich – National Research University "MPEI", Moscow; Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы»

Получено **29.03.2024 г.**

Отредактировано **14.04.2024 г.**

Принято **23.04.2024 г.**

ВОДОРОДНАЯ ЗАПРАВОЧНАЯ СТАНЦИЯ: ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

Чичиров А.А., Разакова Р.И., Гайнутдинов Ф.Р., Гайнутдинова Д.Ф.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

khimiya_kgeu@mail.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** В современном мире, стоящем на пороге глобальных климатических изменений, актуальность поиска и внедрения альтернативных источников энергии обретает особую значимость. Водородная энергетика является одним из наиболее обнадеживающих направлений, предлагая революционный подход к декарбонизации различных отраслей промышленности. Развитие технологий, связанных с производством, хранением и использованием водорода, расширяет новые горизонты для создания устойчивой и экологически чистой энергетической инфраструктуры. **ЦЕЛЬ.** Провести обзор технологического состояния водородных заправочных станций (ВЗС), проанализировать последние мировые тенденции и разработки в этой области, выявить факторы, способствующие повышению эффективности функционирования компонентов ВЗС. Представить термодинамические принципы использования водородного топлива, обозначить основные проблемы, связанные с необходимостью широкого внедрения водородной инфраструктуры и определить потенциальные направления для их решения. Разработать предложения по созданию модульной компоновки водородной станции контейнерного типа, позволяющей гибко подходить к организации водородной инфраструктуры с возможностью быстрого масштабирования и адаптации под различные условия эксплуатации. **МЕТОДЫ.** Использован метод прототипирования автономной водородной заправочной станции, проведен анализ литературных данных, математические расчеты термодинамических процессов, протекающих в компонентах ВЗС. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Изучены и систематизированы исследования в области технологического состояния станций, выявлены тенденции развития. Описаны основные компоненты, участвующие в работе водородной станции. Исследованы термодинамические процессы использования водородного топлива, способствующие значительному уменьшению энергопотребления водородных станций. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Водородная станция сочетает эффективное преобразование водорода в электричество, минимизацию выбросов, энергонезависимость, гибкость хранения энергии. Сделаны выводы на основе термодинамики процессов с учетом специфики температурных режимов российских регионов, для снижения затрат и увеличения энергоэффективности использования водородных топливных систем. Оптимальной платформой для последующих модернизаций и инноваций в области водородных технологий является предложенная структура ВЗС контейнерного типа.

Ключевые слова: водородная заправочная станция; водородные технологии; термодинамические состояния водорода; макет водородной заправки; инфраструктура заправки; оборудование и компоненты.

Для цитирования: Чичиров А.А., Разакова Р.И., Гайнутдинов Ф.Р., Гайнутдинова Д.Ф. Водородная заправочная станция: обзор технологического состояния использования водородного топлива // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 149-165. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-149-165.

HYDROGEN FUELING STATION: REVIEW OF THE TECHNOLOGICAL STATE OF HYDROGEN FUEL USAGE

Chichirov A.A., Razakova R.I., Gainutdinov F.R., Gainutdinova D.F.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

khimiya_kgeu@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* In the modern world, on the verge of global climate change, the search and implementation of alternative energy sources become particularly significant. Hydrogen energy is one of the most promising directions, offering a revolutionary approach to the decarbonization of various industrial sectors. The development of technologies related to the production, storage, and use of hydrogen opens new horizons for creating a sustainable and environmentally friendly energy infrastructure. *OBJECTIVE.* To review the technological state of hydrogen refueling stations (HRS), analyze the latest global trends and developments in this area, identify factors contributing to the efficiency of HRS components, and present thermodynamic principles of hydrogen fuel use. To outline the main problems associated with the need for widespread implementation of hydrogen infrastructure and to identify potential directions for their resolution. To develop suggestions for creating a modular layout of a container-type hydrogen station, which will allow a flexible approach to organizing hydrogen infrastructure with the possibility of rapid scaling and adaptation under various operating conditions. *METHODS.* Based on the use of literature data. The method of prototyping an autonomous hydrogen refueling station was used, and mathematical calculations of thermodynamic processes occurring in the components of HRS were conducted. *RESULTS.* Studies in the field of technological state of stations have been examined and systematized, and development trends have been identified. The main components involved in the operation of a hydrogen station are described. Thermodynamic processes of hydrogen fuel use that contribute to a significant reduction in energy consumption of hydrogen stations have been investigated. *CONCLUSION.* The hydrogen station combines efficient conversion of hydrogen into electricity, minimization of emissions, energy independence, and flexibility in energy storage. Determining the optimal operating parameters of HRS equipment based on the thermodynamics of processes, considering the specifics of temperature regimes of Russian regions, is important for reducing costs and increasing the energy efficiency of hydrogen fuel systems. The proposed structure of the container-type HRS is an optimal platform for subsequent modernizations and innovations in the field of hydrogen technologies.

Keywords: hydrogen refueling station; hydrogen technologies; thermodynamic states of hydrogen; hydrogen refueling mock-up; refueling infrastructure; equipment and components.

For citation: Chichirov A.A., Razakova R.I., Gainutdinov F.R., Gainutdinova D.F. Hydrogen fueling station: review of the technological state of hydrogen fuel usage. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (2): 149-165. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-149-165.

Введение (Introduction)

В последние годы, учитывая глобальный акцент на сокращение выбросов углерода, разработка и применение водородной энергии стали эффективным способом декарбонизации технологий [1-3]. Исследователями описывается потенциал водорода для сокращения выбросов углерода в секторах промышленности [4], транспорте [5], энергетике и домашнем хозяйстве [6]. Как часть стратегии водородной энергетики многих стран, разработка водородных заправочных станций (ВЗС) привлекает все больше внимания. Количество ВЗС по всему миру увеличивается с ускоренными темпами, что способствует более широкому использованию водородного транспорта. К 2021 году в мире функционировало около 550 водородных заправочных станций, 38% из них в Европе. Европа реализует дорожную карту, цель которой – достичь отметки в 1500 станций к 2025 г. [7]. В Европе и Китае количество станций высокоскоростной зарядки составляет примерно 140 и 52 соответственно. Для того чтобы преодолеть существующие трудности и обеспечить успешное внедрение топливо-элементных транспортных средств, Япония установила цель построить 320 станций к 2025 г. и 900 к 2030 г. В Соединённых Штатах функционирует всего около 50 станций высокоскоростной зарядки, большинство из которых находится в Калифорнии [8].

Современные проблемы водородных заливок включают высокую стоимость строительства и обслуживания, недостаточную инфраструктуру, трудности хранения и транспортировки водорода, а также ограниченный спрос из-за малого числа транспортных средств на водородных топливных элементах. Комплекс задач ВЗС, требующих технологических решений отображены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1Проблемы ВЗС
Problems of HRS

Высокая стоимость ВЗС	
Стоимость строительства	\$1-4 млн за станцию: за 1 млн.\$: небольшая или модульная, с ограниченной мощностью и функциональностью; за 4 млн.\$: крупная, полностью оснащенная, с высокой пропускной способностью и дополнительными функциями
Стоимость обслуживания	5-10% от стоимости строительства ВЗС в год
Проблемы хранения водорода	
Высокое давление	Водород хранится при давлении до 700 бар, что требует прочных емкостей
Необходимость охлаждения	Для хранения в жидком виде водород охлаждают до -253°C
Риск утечек	Водород имеет маленькие молекулы, склонные к просачиванию через микроскопические отверстия
Требование к материалам оборудования	Материалы должны выдерживать экстремальные условия и не вступать в реакцию с водородом
Транспортировка водорода	
Уникальные свойства газа	Очень низкая плотность в газообразном состоянии
Сжатие и сжижение газа	Сжатие водорода до высоких давлений и его сжижение при очень низких температурах требуют значительных энергозатрат и специализированного оборудования, что увеличивает стоимость топлива

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Серьезные технологические и логистические проблемы и требуют разработки и интеграции новых технологий для производства водорода, хранения и выдачи продукта.

Водородные станции классифицируют по различным параметрам, включая источник водорода, метод его хранения и способ подачи к автомобилю (рис. 1).

1. По источнику водорода: производится непосредственно на ВЗС, обычно путем электролиза воды или реформинга природного газа (on-site); производится в другом месте и доставляется на ВЗС в сжатом или жидком виде (off-site) [9].

2. По методу хранения водорода: ВЗС на сжатом водороде, газ хранится при высоком давлении в специальных емкостях (350-700 бар) GH_2 ; ВЗС на жидком водороде, газ хранится в охлажденном до криогенных температур состоянии LH_2 ; гибридные системы ВЗС - сочетают в себе элементы обоих методов [10].

3. По способу подачи водорода: водители заправляют свои транспортные средства самостоятельно (self-service); обслуживание проводится персоналом станции (full-service).

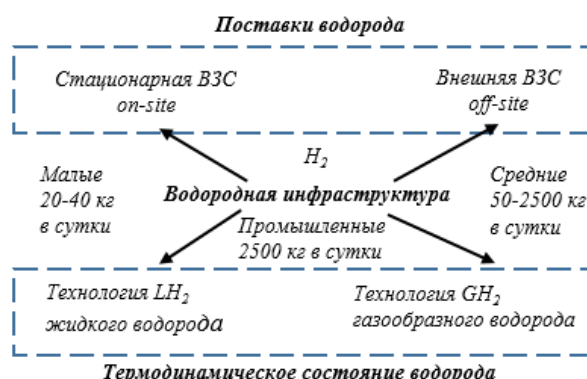


Рис.1. Классификация ВЗС

Fig.1. Classification of HRS

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В соответствии основным режимом поставки топлива, позволяющие заправлять транспортные средства, оборудованные резервуарами для водородного газа под высоким давлением примерно 700 бар функционируют четыре типа заправочных станций [11]:

1. Станции, работающие с жидким водородом, оснащенные системами для его

газификации и компрессии.

2. Станции, принимающие сжатый водород под давлением в 200 бар, получаемый из трубных трейлеров, имеющие установки для увеличения давления до 400–700 бар.

3. Комплексы, получающие газообразный водород через трубопроводы, с оборудованием для повышения давления в диапазоне от 100 до 400–700 бар.

4. Станции, генерирующие водород на месте с использованием компактных электролизеров системами компрессии, способными достигать давления от 15 до 400–700 бар.

Станции могут представлять собой комбинацию различных типов, чтобы компенсировать нехватку водорода из-за малых количеств, произведенных с помощью производственных систем на месте [12].

Литературный обзор (Literature Review)

Для широкого внедрения водородного транспорта необходимо наличие достаточного количества ВЗС для их поддержки. Понимание текущего состояния водородной инфраструктуры важно для оценки осуществимости и масштабируемости транспорта, работающего на водороде. Анализ развития технологий ВЗС представлен в таблице 2.

Таблица 2

Tabl 2

Обзор технологического развития ВЗС
Review of Technological Development of HRS

Этапы развития ВЗС	Описание технологического состояния ВЗС
1988 г. Системы на жидком водороде	Устройство для заправки водородных автомобилей с системой хранения жидкого водорода, которая состояла из нескольких клапанов, двух шлангов и соединений с баком автомобиля [13]
1999 г. Системы с применением электрохимических технологий	Демонстрационная установка ВЗС, использующая водород в качестве энергоносителя, электролизер и топливный элемент [14]
2003 г. Предложены три способа подачи водорода на борт	Крупномасштабное производство водорода, а затем его распределение по трубам или грузовикам на заправочные станции; производство газа на многих рассредоточенных объектах, таких как станции технического обслуживания, и подача его в автомобили; внедрение бортового риформинга углеводородного топлива (бензин, метанол, природный газ) [15]
2007 г. Изучение мероприятий по безопасности использования водорода на ВЗС	Исследованы аспекты безопасности водородной инфраструктуры для транспортных средств [16, 17] проведена оценка рисков и принят кодекс «Программный инструмент анализа опасностей процессов» PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) [18, 19]
2012 г. Сбор данных о производительности ВЗС	Проанализировали данные о более чем 1000 процессах заправки, чтобы определить профили обслуживания, и сравнили их с бензиновыми заправочными станциями [20]
2017 г. Совершенствование технологий хранения водорода	Изучены пять технологий хранения водорода: сжатый газообразный водород при 350 и 700 бар [21], жидкий криосжатый водород [22], адсорбирующие материалы [23] и холодный водород под давлением [24, 25]
2018 г. Системы охлаждения водорода	Комплексный анализ систем предварительного охлаждения водорода для быстрой заправки топливом на 700 бар, включая эффект Джоуля-Томсона на станции [26, 27]
2019 г. Изучение способов снижения затрат на эксплуатацию ВЗС	Подход к управлению резервуарами-накопителями (метод двухуровневой консолидации давления), позволяющий снизить потребление энергии на 20 % за час работы [28, 29]

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Согласно литературным данным, большинство ученых обращают внимание на следующие темы: расположение станции [30], технико-экономический анализ [31, 32], оптимизация уровня давления [33], исследование процессов заправки [34], оценка рисков, анализ, связанный с безопасностью [35, 36], и исследования конкретного оборудования, такого как компрессоры, системы хранения и дозирующие устройства [37]. В целом, исследователи проявляют все больший интерес к этим энергетическим системам, работая над широким спектром разнообразных областей исследований, включая инновации в

оборудовании и технологиях, схема станции, а также сбор данных для тестирования производительности.

Авторами [38] изучена инвестиционная целесообразность для потенциальных инвесторов, чтобы стимулировать их инвестиции в развитие водородных заправочных станций, что является ключевым для водородной промышленности.

Сравнение технологий газового и жидкого водорода отображено в таблице 3.

Таблица 3

Tabl 3

Сравнительный анализ технологий газообразного и жидкого водорода
Comparative Analysis of Gaseous and Liquid Hydrogen Technologies

Показатель станции	Заправочные станции с газообразным водородом Gaseous hydrogen, GH_2	Заправочные станции с жидким водородом Liquid hydrogen, LH_2
Хранение водорода	Для хранения 1 кг водорода при 1 бар и 25 °С требуется резервуар объемом 12,3 м ³ , что составляет 20 % энергоёмкости станции. Водород, сжатый при давлении 350 бар занимает менее 99,6 % объема. Более высокое давление в хранилищах, равное 700 бар, принесет преимущества с точки зрения скорости заправки и накопленных объемов [39]	Для хранения требуются низкие температуры, что, составляет около 40 % энергоёмкости станции. Жидкий водород, хранящийся при температуре -253 °С, используется, когда требуется высокая плотность хранения, Специальные резервуары при криогенных температурах должны обладать высокой изоляционной способностью, чтобы уменьшить выкипание водорода [40]
Компоненты станции	1. Электролизеры щелочные или протономембранные РЕМ, установки парового риформинга метана (on-site); трубчатые прицепы для подачи водорода на станцию при среднем давлении (200-500 бар), вмещают от 250 до 1000 кг водорода (off-site); 2. Компрессоры высокого давления; 3. Резервуары для хранения водорода в сжатом виде; 4. Система терморегулирования; 6. Оборудование безопасности для устранения взрывов и утечек; 7. Дозаторы для заправки транспорта (диспансер)	1. Секция начального хранения топлива. Криогенные автоцистерны для подачи водорода на станцию, специализированные резервуары; 2. Криогенные установки или криогенные насосы; 3. Изолированные резервуары для хранения при крайне низких температурах; 4. Система терморегулирования; 5. Оборудование безопасности для устранения взрывов и утечек; 6. Дозаторы для заправки транспорта (диспансер)
Схемы ВЗС	Схемы ВЗС с газохранилищами: каскадная заправка; прямая заправка топливом с использованием водородного компрессора	Схема ВЗС, когда газообразный водород, образуется в теплообменнике в результате испарения жидкого водорода; схема ВЗС с криогенным насосом

В дополнение к этим техническим аспектам, продолжают исследования в области мер водородной безопасности и правил [41, 42]. Разрабатываются протоколы реагирования на чрезвычайные ситуации, обучение лиц, оказывающих первую помощь, и готовность к чрезвычайным ситуациям из-за легковоспламеняющейся природы водорода [43, 44].

Научное сообщество исследовало различные схемы и конфигурации водородной инфраструктуры [45, 46].



Рис. 2 Схема ВЗС с каскадным процессом заправки (SMR –паровая конверсия метана; WE – электролиз воды)

Fig. 2 Schematic of HRS with Cascade Refueling Process

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 2 изображена схема ВЗС с каскадной системой заправки. На этой станции, водород подается в бак автомобиля, при разнице давлений между резервуарами на заправочной станции и баком автомобиля. Водород поступает на ВЗС различными способами: доставляется грузовыми автомобилями, по трубопроводам или производится непосредственно на месте с помощью электролизеров (WE) или реформеров (SMR). Важную роль в данной системе играет компрессор, сжимающий водород до высокого давления (950 бар) для его хранения и последующей заправки автомобилей. Даже если исходное давление газа от источника подачи невелико (например, 20 бар), компрессор способен повысить его до необходимого уровня. Каскадная система хранения включает несколько резервуаров, которые могут быть последовательно использованы для заправки транспортных средств. Когда давление в одном из резервуаров падает ниже определенного уровня, который может помешать эффективной заправке, компрессор включается для восстановления необходимого давления. Перед подачей в бак автомобиля, водород проходит через блок предварительного охлаждения, который снижает его температуру до около -40 °С.

Основной проблемой каскадной системы заправки является её ограниченная пропускная способность, которая зависит от количества и объема резервуаров высокого давления. После серии заливок, когда давление в резервуарах упадет до недостаточного уровня, потребуется время для их повторного наполнения до высокого давления, может привести к задержкам в обслуживании следующих клиентов.



Рис. 3. Схема ВЗС с дожимным дозирующим компрессором (SMR –паровая конверсия метана; WE – электролиз воды)

Fig. 3. Schematic of HRS with Booster Dispensing Compressor

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 3 представлена схема ВЗС функционирующая по принципу прямого процесса заправки. Конфигурация включает использование двух компрессоров: накопительного и бустерного, для достижения необходимого высокого давления, требуемого для заправки топливом. Водород, хранящийся в системе под средним давлением, сначала подается в накопительный компрессор, где сжимается до промежуточного уровня давления. Затем бустерный компрессор дополнительно повышает давление водорода до 900 бар, что является оптимальным для заправки большинства современного водородного транспорта. После этапа сжатия водород направляется в буферные резервуары высокого давления, служащие для временного хранения газа перед

его подачи в топливную систему автомобиля. Резервуары обеспечивают наличие достаточного количества водорода под высоким давлением для обслуживания нескольких транспортных средств подряд без необходимости ожидания процесса компрессии. Далее, водород проходит через охладитель, который снижает его температуру для увеличения плотности и предотвращения нежелательного нагрева в баке автомобиля во время заправки. Охлажденный водород подается в бак автомобиля через дозатор, контролирующий объем и скорость заправки. Такой подход к конструкции ВЗС позволяет оптимизировать процесс заправки, уменьшая время ожидания для потребителей и повышая пропускную способность станции. Тем не менее требуется точный контроль за работой компрессоров и охладительных систем для обеспечения безопасности, и эффективности процесса заправки.

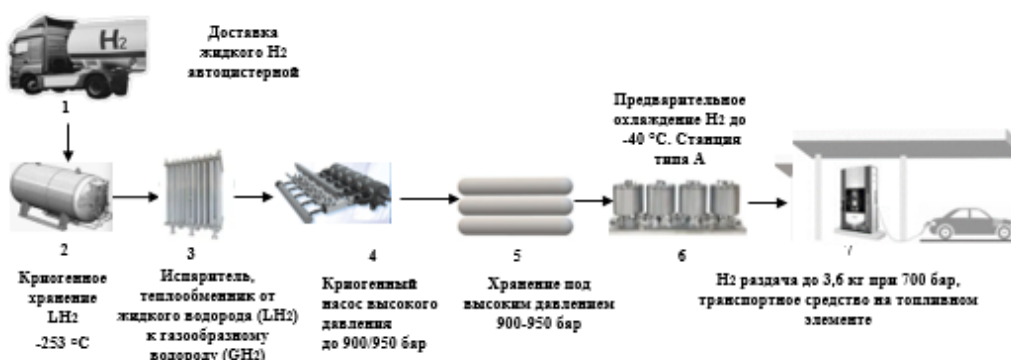


Рис. 4. Схема ВЗС с испарителем / Fig. 4. Schematic of HRS with Vaporizer / Heat Exchanger

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Схема ВЗС, изображенная на рисунке 4, использует газообразный водород, который образуется в теплообменнике за счёт испарения жидкого водорода под воздействием тепла окружающей среды. Испарившийся водород собирается в верхней части криогенного резервуара, создавая запас газообразного водорода для дальнейшего использования. Далее жидкий водород сжимается до давления в 950 бар в резервуаре высокого давления с помощью компрессора. Процесс заправки включает в себя многократные циклы сжатия водорода до тех пор, пока не будет достигнуто требуемое давление в баке автомобиля. Перед тем как водород будет подан в бак, он проходит через холодильный агрегат. Охлаждение водорода до -40 °C. увеличивает его плотность и снижает риск теплового расширения водорода в баке, что может возникнуть при более высоких температурах, улучшая тем самым безопасность и эффективность процесса заправки.

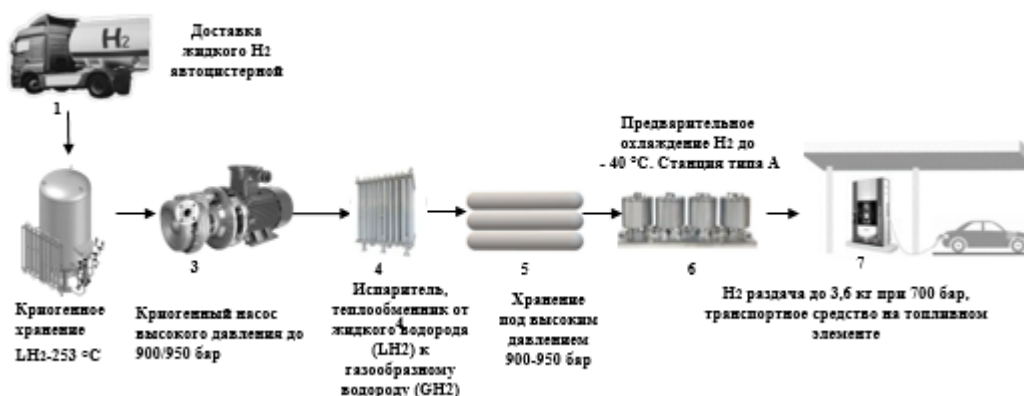


Рис. 5. Схема ВЗС с криогенным насосом / Fig. 5. Schematic of HRS with Cryogenic Pump

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 5 демонстрируется схема ВЗС с криогенным насосом. В этой системе водород поступает в жидком состоянии, что обеспечивает его плотное хранение и удобство транспортировки. Криогенный насос обеспечивает необходимое давление и температуру для перевода водорода из жидкого в сверхкритическое состояние. В этом состоянии водород (-240°C; 13 бар) не имеет отдельных жидких и газообразных фаз и обладает

уникальными свойствами, такими как повышенная плотность энергии, что может улучшить его хранение и передачу. Перевод жидкого водорода в газообразное и достижение сверхкритического состояния – это разные аспекты процесса, и не все водородные заправочные станции используют сверхкритический водород. Большинство станций сегодня используют водород в газообразном состоянии под высоким давлением (700 бар) для заправки транспортных средств. Перед подачей в топливный бак, газ проходит через криогенный теплообменник, где охлаждается с использованием жидкого водорода.

Авторы [47] предлагают гибридные решения, когда станция функционирует с каждой конфигурацией дозаправки независимо, что позволяет ей выполнять операции дозаправки при любых обстоятельствах, даже если один из компонентов двух конфигураций выходит из строя.

В статье [48] анализируется инновационная энергетическая система, основанная на водородной станции, как ядре интеллектуального центра производства энергии, где полученный водород затем используется в различных водородных технологиях, принятых и установленных поблизости от станции.

Режим работы ВЗС зависит от множества факторов, включая тип станции, объем потребления водорода и логистику.

Международный опыт реализации водородных технологий показывает, что ключевыми проблемами при эксплуатации станций становятся энергоэффективность, экономичность и надежность использования водорода в экстремальных региональных температурных условиях. В связи с этим актуальны исследования в области термодинамики водородных систем, но они в малом объеме освещены в литературе.

Климатические условия влияют на эффективность хранения и дозаправки водорода, особенно при очень низких или высоких температурах учетом специфики температурных режимов российских регионов. При очень низких температурах водород может сжижаться или замерзать, что требует дополнительной энергии для его газификации перед заправкой. При высоких температурах может возрасти давление в хранилищах, что требует систем охлаждения. Эффективность и безопасность ВЗС могут быть нарушены вне диапазона -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$ [49].

С точки зрения транспорта водорода наиболее перспективным маршрутом представляется маршрут газопроводов, который в настоящее время ограничен целым рядом проблем, в том числе опасностью водородного охрупчивания и высокими капиталовложениями, необходимыми для строительства крупномасштабной сети газопроводов. Такие затраты были бы оправданы только доминирующим выходом водорода на рынок альтернативного топлива.

Глобальная автоиндустрия, производители газа и оборудования достигли консенсуса относительно стандарта для заправки водородом легковых машин (SAE, 2016). Стандарт устанавливает параметры для температуры топлива при подаче, максимальной скорости его потока и давления при заправке [50]. Заправочные станции для легковых автомобилей работают со сжатым водородом под давлением 700 бар, автобусы заправляются сжатым водородом под давлением 350 бар (BMVI, 2016). Заправка легковых автомобилей занимает 3 мин с водородом, охлажденным до -33 до -40°C (H₂ME, 2016).

Общество автомобильных инженеров (SAE) разработало протоколы заправки для легковых транспортных средств на газообразном водороде (FCEV). Протокол заправки классифицирует ВЗС по температуре предварительного охлаждения и давлению заправки, и устанавливает среднюю скорость нарастания давления на основе температуры окружающей среды, которая поддерживается постоянной в течение периода заправки. Контролируются параметры различных категорий ВЗС, давление и температура процесса заправки водородом в пределах нормы, чтобы обеспечить быструю заправку транспортного средства [51].

Исследования в области ВЗС в России находятся на этапе разработки водородных технологий с применением отечественного оборудования [52, 53] и обсуждения затрат энергии, перспективности создания ВЗС [54, 55].

Таким образом, исследовано современное состояние и динамика развития водородных заправочных станций, выявлены наилучшие практики и накопленный опыт разработки ВЗС в России. Проанализированы различные конфигурации ВЗС и их комбинации с хранилищами жидкого водорода (LH₂) и газообразного водорода (GH₂), выявлены преимущества и недостатки каждой из них. Следует отметить, что идеального устройства водородной станции не существует. Кроме того, необходимо учитывать множество факторов, включая окружающие условия, геополитические реалии, развитие

местного рынка, объемы водородного транспорта, удаленность от центров производства водорода, логистические схемы, а также местные нормы и стандарты.

Будущие тенденции подразумевают производство водорода непосредственно на месте использования как способ сокращения энергопотребления и выбросов, связанных с его транспортировкой. Среди различных технологий локального производства электролиз воды выделяется как экологически чистый и легко адаптируемый метод.

Современные исследования в области водородных заправочных станций направлены на повышение эффективности и безопасности систем хранения и распределения водорода, а также на разработку новых устойчивых способов его производства.

Системы преобразования энергии в газ и установки для заправки водородом становятся все более значимыми как жизнеспособные альтернативы традиционной топливной инфраструктуре, так как они способствуют глубокой декарбонизации и обеспечивают долгосрочное хранение энергии.

Обзор текущих исследований, концепций и компоновок ВЗС предоставляет ценную информацию и способствует глубокому пониманию текущего состояния и будущего потенциала инфраструктуры заправки водородом, её воздействия на транспорт, энергетические системы и окружающую среду.

Материалы и методы (Materials and methods)

Методы исследования, применяемые в работе, включают в себя анализ литературных источников по использованию технологий на водородных автозаправочных станциях, математические расчеты.

Эффективность работы ВЗС зависит от термодинамических процессов хранения и передачи топлива. Предварительные термодинамические расчеты помогают понять энергетические процессы и эффективность водородной системы.

При хранении водорода в баллонах, газ должен быть предварительно сжат, когда на 1 моль затрачивается работа сжатия $W_{сж}$:

$$W_{сж} = \frac{1}{\eta_k} RT \ln \frac{P}{P_0}$$

где P_0 и P - начальные и конечные давления, R - универсальная газовая постоянная, T - абсолютная температура, η_k - КПД компрессора. Считаем процесс адиабатным, учитывая интегральный эффект Джоуля-Томсона:

$$W_{сж} = \frac{1}{0,86} 8,31 \cdot 293 \cdot \ln \frac{400}{5} = 58887,2 \text{ Дж/моль} = 58,88 \text{ кДж/моль}$$

В результате для разности температур газа получаем:

$$T_2 - T_1 = \frac{1}{(C_v + R)} \left(\frac{RT_1 b}{V_1 - b} - \frac{2a}{V_1} \right)$$

$$T_2 - T_1 = \frac{1}{(29,83 + 8,31)} \left(\frac{8,31 \cdot 293 \cdot 26,653}{0,04 - 26,653} - \frac{2 \cdot 0,0245}{0,04} \right) = -0,096 \text{ К}$$

При стандартных условиях V_1 значительно превышает b , следовательно, изменение знака эффекта Джоуля-Томсона происходит при определённой температуре, известной как температура инверсии. Подставляя параметры для определённого газа, можно вычислить температуру инверсии для водорода. Если эффект Джоуля-Томсона наблюдается при температурах выше температуры инверсии, то температура газа повышается: $\Delta T > 0$. В противном случае, при температурах ниже температуры инверсии, температура снижается: $\Delta T < 0$. Температура инверсии коррелирует с критической температурой:

$$T_i = \frac{2a}{Rb} = \frac{27}{4} T_{кр} = 6,75 \cdot T_{кр}$$

Максимальная температура инверсии для водорода составляет -57°C при нормальном атмосферном давлении. Это говорит о том, что адиабатическое расширение реального газа приводит к изменению его температуры

Изменение энтропии газа в этом процессе, учитывая известную молярную теплоёмкость водорода C_V :

$$\Delta S = C_V \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \ln\left(\frac{V_2 - b}{V_1 - b}\right)$$

$$\Delta S = 29,83 \cdot \ln\left(\frac{233}{293}\right) + 8,31 \cdot \ln\left(\frac{4 - 26,653}{0,04 - 26,653}\right) = -56,41 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}.$$

Работа, совершаемая водородом при изотермическом расширении его от объема V_1 до V_2 при температуре T :

$$A = RT \ln\left(\frac{V_2 - b}{V_1 - b}\right) + \frac{a}{V_2} - \frac{a}{V_1}$$

$$A = 8,31 \cdot 233 \ln\left(\frac{4 - 26,653}{0,04 - 26,653}\right) + \frac{0,0245}{4} - \frac{0,0245}{0,04} = 311,376 \text{ Дж/моль}.$$

Термодинамические расчеты являются важными при проектировании и эксплуатации водородных АЗС, определяя их эффективность, безопасность и экономичность. Исходя из понимания процессов преобразования и использования энергии на водородных заправочных станциях, можно использовать эту информацию для оптимизации системы. Такой подход способствует улучшению эффективности станций и снижению операционных издержек.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Результаты исследования демонстрируют, что международный опыт в области водородных технологий позволяет выделять наиболее успешные инженерные решения и практики эксплуатации ВЗС. Выполнено моделирование водородной станции, включающей процессы производства водорода на месте методом электролиза, его хранения и распределения при различных давлениях. С целью создания опытно-промышленной малой станции способной производить 30 кг H_2 /сутки, разработан макет ВЗС с мощностью 8,5 кг H_2 /сутки для тестирования технологии.

Представлена концепция архитектуры водородной заправочной станции, основанная на использовании оборудования российского производства, что представляет значительный интерес. В рамках исследования проведены маркетинговые исследования рынка, оценены доступные технологии и потенциал их интеграции. ВЗС контейнерного типа, демонстрирующий применение отечественных разработок в данной области.

Необходимо подчеркнуть, что ассортимент компактных водородных компрессоров, способных обеспечивать давление в 700 бар и выше для полной заправки транспортных средств, ограничен. Пользователи могут столкнуться с проблемами при подборе оборудования, достаточного для достижения давления в 900 бар, что необходимо для компенсации температурного расширения водорода. Дополнительно, во избежание водородного охрупчивания материалов в компрессорах требуется использование высокопрочных материалов и специальных покрытий, таких как алитирование, для предотвращения утечек и загрязнения водорода. Стандарты на максимально допустимую концентрацию водорода строго регламентированы и не должны превышать 2300 ppm в защищенной зоне станции и в помещениях.

Панельно-блочный контейнер ВЗС включает три отсека (модуля) с отдельными входами: отсек управления и силовой электроники; отсек генерации водорода; отсек компримирования водорода (рис. 6). Контейнер разделен непроницаемыми перегородками и оборудован климат-контролем (внешние условия от -40°C до $+45^\circ\text{C}$; внутренние условия от $+10^\circ\text{C}$ до $+45^\circ\text{C}$), принудительной проточно-вытяжной вентиляцией, контролем загазованности, пожарной сигнализацией, пожаротушением и другими важными компонентами.

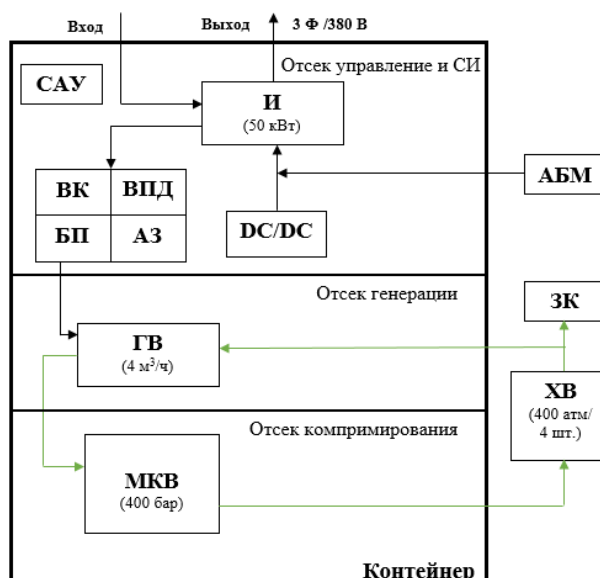


Рис. 6. Блок схема макета ВЗС

Fig. 6. Schematic of the multifunctional HRS prototype

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

САУ – система автоматического управления; И – инверторная подсистема преобразователей; ВК – воздушный компрессор; ВПД – блок водоподготовки; БП – блок питания; АЗ – система продувки азотом; DC/DC – преобразователи; ГВ – генератор водорода на основе электролизеров с твердополимерной мембраной МФ-4СК; МКВ – мембранный компрессор водорода; АБМ – аккумуляторная батарея; ХВ – хранилище водорода; ЗК – заправочная колонка (заправка водородом).

Содержание отсеков. Модуль автономной генерации водорода обеспечивает производство водорода объемом 4 м³/ч с чистотой 99,995%. Он включает в себя следующие компоненты: дистиллятор для очистки воды и получения деионизированной воды с удельной электропроводностью <0,1 мкСм/см, электрохимический генератор водорода для непосредственного производства газа, а также систему для дополнительной очистки и осушки газа до заданного уровня чистоты.

Модуль компримирования и хранения водорода предназначен для его содержания при различных уровнях давления. В его состав входят ресиверы для хранения водорода под давлением 10 бар, компрессор для закачки водорода в баллоны высокого давления и металлокомпозитные баллоны, предназначенные для хранения водорода под давлением 400 бар.

Инверторная подсистема позволяет подключать герметичные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи (20 штук по 50 А·ч каждая при напряжении 12 В), общей емкостью энергии 12 кВт·ч.

Система автоматического управления обеспечивает дистанционное управление и мониторинг работы ВЗС, включая программное обеспечение станции и удаленного диспетчера. ВЗС спроектирована с возможностью масштабирования производительности до 100 кг водорода в сутки.

Хранилище водорода расположено вне контейнера с возможностью расширения емкости хранения.

Топливораздаточная колонка газообразного водорода включает водородный теплообменник для охлаждения газа перед заправкой транспортных средств и газораспределительную колонку для непосредственной раздачи топлива.

Для проведения тестовых испытаний оборудования макета предполагается применение стендов, позволяющих оценивать работу оборудования в различных климатических условиях, проверять соответствие нормам освещения, безопасности низковольтного оборудования, потреблению электроэнергии, электромагнитной совместимости, а также систем пожарной сигнализации и пожаротушения. Важным аспектом является анализ качества водорода, тестирование насосного оборудования и систем водоснабжения.

Заключение (Conclusion)

Проведенный анализ актуальных исследований и инженерных разработок в области водородных заправочных станций подчеркивает значимость этих технологий для

развития водородной экономики в транспортной индустрии. ВЗС могут служить фундаментом для создания эффективных и экологически чистых энергетических систем, но для их успешной интеграции предстоит выполнить значительный объем работы.

Продуманная структура контейнерного типа ВЗС, предложенная в данной работе, обеспечивает безопасность и удобство в эксплуатации, представляя собой платформу для последующих модернизаций и инноваций. Важным аспектом является определение оптимального сочетания компонентов станции, что должно проводиться с учетом термодинамических свойств процессов и особенностей температурных режимов, что снизит затраты и увеличит эффективность использования водородных топливных систем.

Особое внимание стоит уделить адаптации технологий ВЗС к различным климатическим условиям, включая российские регионы, что позволит сократить затраты и повысить эффективность водородных топливных систем на новом уровне.

Предложенная структура ВЗС контейнерного типа обеспечивает четкое разделение функциональных зон и упрощает обслуживание. В дальнейшем стоит задача дальнейшего совершенствования ВЗС, включая улучшение материалов, технологий хранения и распределения водорода. Все это требует продолжения исследований, разработки новых инженерных решений и тесного взаимодействия научного сообщества с промышленностью и государственными органами для достижения целей устойчивого развития и перехода к низкоуглеродной экономике.

Результаты получены при финансовой поддержке Минобрнауки и Минцифры России в рамках исполнения условий соглашений № 075-15-2021-1087 и № 075-15-2021-1178 от 30.09.2021 в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет – 2030».

Литература

1. Robles I.J.O., Almaraz S.D-L., Pantel C.A. Hydrogen as a Pillar of the Energy Transition // Hydrogen Supply Chains. Academic Press. 2018. Vol. 1, pp. 3-35.
2. Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д. и др. Современные направления развития водородных энергетических технологий // Надежность и безопасность энергетики. 2019. №2(12). С. 89-96.
3. Филимонов А.Г., Филимонова А.А., Чичиров А.А. и др. Глобальное энергетическое объединение: новые возможности водородных технологий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 3. С. 3-13.
4. Ahmeda A., Quasem Al-A. A., Ambrosea A.F. et al. Hydrogen fuel and transport system: A sustainable and environmental future // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41. pp. 1369-1380.
5. Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Разакова Р.И. Электрохимические технологии для автомобилей на водородном топливе // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С. 104-115.
6. Joydev M. Chapter 7.2 - Overview on application of hydrogen // Towards Hydrogen Infrastructure. 2024. pp. 401-430.
7. Alazemiab I.J., Andrews J. Automotive hydrogen fuelling stations: An international review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 48. pp. 483-499.
8. Pang Y., Martinez Y.A., Hydrogen refueling stations/infrastructure // Fuel Cells for Transportation. 2023. Vol. 18. pp. 575-597.
9. Дудник А.Н., Мелак В.Г. Водородные заправочные станции // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2007. № 4. С. 3-12.
10. Reddi K., Elgowainy A., Rustagi N., et al. Impact of hydrogen refueling configurations and market parameters on the refueling cost of hydrogen // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42, N34, pp. 21855–21865.
11. Rose P.K., Neumann F. Hydrogen refueling station networks for heavy-duty vehicles in future power systems // Environ. 2020. Vol. 83, pp. 102358.
12. Genovese I.M., Fragiaco P. Hydrogen refueling station: overview of the technological status and research enhancement // Energy Storage. 2023. Vol. 61, pp. 106758.
13. Fieseler H., Hettinger W., Kesten M. On-board fuel storage and supply system of a liquid hydrogen powered experimental passenger car // Proceedings of the Twelfth International Cryogenic Engineering Conference Southampton, UK, 12–15 July 1988 (1988), 10.1016/b978-0-408-01259-1.50024-3.
14. Meurer C., Barthels H., Brocke W.A., et al. Phoebebus – an autonomous supply system with renewable energy: six years of operational experience and advanced concepts // Energy. 1999. Vol. 67, pp. 131-138.

15. Tanaka T., Azuma T., Evans J.A., et al.. Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model // *Energy*. 2007. Vol. 32, pp. 2162-2170.
16. Rosyid O.A., Jablonski D., Hauptmanns U. Risk analysis for the infrastructure of a hydrogen economy // *Energy*. 2007. Vol. 32, pp. 3194-3200.
17. Molkov V., Kashkarov S. Blast wave from a high-pressure gas tank rupture in a fire: stand-alone and under-vehicle hydrogen tanks // *Energy*. 2015. Vol. 40, pp. 12581-12603.
18. Шебеко Ю.Н. Болодьян И.А. Международный опыт обеспечения пожарной безопасности водородных автозаправочных станций // *Вести газовой науки*. 2022. №2 (51). С. 151-158.
19. Pagliaro M., Iulianelli A. Hydrogen Refueling Stations: Safety and Sustainability // *Energy*. 2019. N9. pp. 8-13.
20. Dodds P.E., McDowall W. Review of hydrogen delivery technologies for energy system models // *Uk Shc* (2012), pp. 3-35.
21. Striednig M., Brandstätter S., Sartory M., et al. Thermodynamic analysis of the real gas refueling process // *Energy*. 2014. Vol. 39, pp. 8495-8509.
- Li Z, Pan X, Sun K, et al. Development of safety standard for mobile hydrogen refueling facilities in China // *Energy*. 2014. Vol 39, pp. 13935-13939.
23. Elgowainy A., Wang M., Joseck F., et al. Life-cycle analysis of fuels and vehicle technologies // *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, Elsevier, Oxford. 2017. pp. 317-327.
24. Kurtza J, Sprika S, Bradleyb TH. Review of transportation hydrogen infrastructure performance and reliability // *Review of transportation hydrogen infrastructure performance and reliability*. 2019. Vol. 44, N23. pp. 12010-12023.
25. Brown T., Kisting H. Analysis of customer queuing at hydrogen stations // *Energy*. 2022. Vol. 47, pp. 17107-17120.
26. Sinigaglia T, Lewiski F, Santos Martins ME, et al. Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications-a review. // *Energy*. 2017. Vol. 42, pp. 24597-24611.
27. Dagdougui H., Sacile R., Bersani C., et al. Hydrogen storage and distribution: implementation scenarios // *Hydrogen Infrastructure for Energy Applications*. 2018. N1. pp. 37-52.
28. New Argonne technology could reduce the cost of hydrogen refueling / *Fuel Cells Bull.*, 2018 (2018), pp. 14-15, 10.1016/S1464-2859(18)30223-2.
29. Mayer T., Semmel M., Guerrero Morales M.A., et al Techno-economic assessment of liquid or gaseous hydrogen refueling stations // *Energy*. 2019. pp.1-25. 10.1016/j.ijhydene.2019.08.051.
30. Алексеева О. К., Козлов С.И., Фатеев В. Н. Транспортировка водорода // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2011. №3 (21). С. 18 -24.
31. Григорьев С.А., Коробцев С.В. Электрохимические водородные компрессоры/концентраторы на основе твердополимерного электролита // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2011. №5 (23). С. 57-59.
32. Алексеева О.К., Козлов С.И., Фатеев В.Н. Транспортировка водорода // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2011. №3 (21). С. 18-24.
33. Лосев О.Г., Марусева И.В., Пушкарев А.С., и др. Заправочная станция на возобновляемых источниках энергии для водородного и электрического транспорта // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2013. №3 (33). С. 15-18.
34. Wen S., He G. Review of hydrogen station technology development through patent analysis // *Clean Energy*. 2018. Vol. 2, pp. 29-36.
35. Чикунев, Г.В., Гайнутдинов Ф.Р. Водородные АЗС - режим функционирования // *Энергия-2022. Теплоэнергетика: Семнадцатая всероссийская (девятая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых*. В 6 т., Иваново, 11–13 мая 2022 г. Иваново: ИГЭУ, 2022. С. 87.
36. Ali MS, Khan M. SH, Tuhin RA, et al. Challenges of hydrogen storage and transportation: A review of recent advancements. // *Hydrogen Energy Conversion and Management* 2024. pp. 255-287.
37. Abidin Z, Tang C, Liu Y, et al. Catchpole Current status and challenges of hydrogen storage technologies. // *Towards Hydrogen Infrastructure*, Elsevier. 2024. pp. 101-132.
38. Zhao T., Liu Z. Investment in hydrogen refueling station based on compound real options // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 57, Pp. 198-209.
39. Макуева, Д.А., Разакова Р.И. Состояние и перспективы внедрения водородных заправочных станций // *Тинчуринские чтения - 2023 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалы Международной молодежной научной конференции*. В 3-х томах, Казань, 26–28 апреля 2023 г. Казань: КГЭУ, 2023. С. 118-120.
40. Paster M.D., Ahluwalia R.K., Berry G., et al. Hydrogen storage technology options for fuel cell vehicles: well-to-wheel costs, energy efficiency, and greenhouse gas emissions // *Energy*. 2011. Vol. 36,

pp. 14534-14551.

41. Раменский А.Ю. Водород в качестве топлива: предмет и цели стандартизации. Альтернативная энергетика и экология (ISJAE). 2015. № 1. С. 33-44.

42. Закиров Р.Н Чичирова Н.Д., Филимонова А.А. др. Нормативно-техническая документация по промышленной безопасности при производстве водорода // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. №5). С. 91-100.

43. San Marchi C., Hecht E.S, Ekoto I.W., et al. James Overview of the DOE hydrogen safety, codes and standards program, part 3: Advances in research and development to enhance the scientific basis for hydrogen regulations, codes and standards // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42, N11, pp. 7263-7274.

44. Pique S., Weinberger B., De-Dianous V., et al. Comparative study of regulations, codes and standards and practices on hydrogen fuelling stations // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42, N11. pp. 7429-7439.

45. Rothausen E., Rokni M. Optimization of total energy consumption at cascade refueling stations for hydrogen vehicles // Energy. 20014. Vol. 39, pp. 582-592.

46. Архаров И.А., Архаров А.М., Навасардян Е.С. Сравнение удельных затрат энергии в циклах реконденсации паров водорода для криогенных систем заправочных станций. Альтернативная энергетика и экология (ISJAE). 2018. Т.4. №6. С. 57-69.

47. Zhua L., Leia G., Gaob J. Research on key influencing factors for site selection of DC microgrid-based hydrogen-electric hybrid refueling stations. // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48, N100. pp. 39759-39779.

48. Genovese M., Fragiaco P. Evolution of the hydrogen station towards a polygenerative energy system // Energy. 2022. Vol. 47, pp. 12264-12280.

49. Serdaroglu G., Huz M., Gillott M., et al. The impact of environmental conditions on the operation of a hydrogen refueling station // Energy. 2015. Vol. 40, pp. 17153-17162.

50. Reddy K., Elgowainy A., Rustagi N., et al. Impact of hydrogen refueling methods SAE J2601 on the refueling time of fuel cell passenger vehicles. // Energy. 2017. Vol. 42, pp. 16675-16685.

51. Gye H-R., Seo S-K., Bach Q-V., et al. Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station. // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44, N2. pp. 1288-1298.

52. Егоров А.А., Фомин А.В. Сравнительный анализ **водородных заправочных станций** и автомобильных газовых заправочных станций // Материалы Международной XXXIV научно-практической конференции, посвященной 85-летию образования ФГБУ ВНИИПО МЧС России «Актуальные проблемы пожарной безопасности», Балашиха, 23–24 августа 2022 г. Москва: 2022. С. 708-713.

53. Дмитриев А.Л., Иконников В.К. Водородная заправочная станция на основе установки получения водорода гидротермальным методом окисления промышленных порошков алюминия. Альтернативная энергетика и экология (ISJAE). 2017. Т. 10. №12. С. 75-85.

54. Архаров И.А., Архаров А.М., Навасардян Е.С. Сравнение удельных затрат энергии в циклах реконденсации паров водорода для криогенных систем заправочных станций. Альтернативная энергетика и экология (ISJAE). 2018. Т.4. №6. С.57-69.

55. Гайнутдинова Д. Ф. Перспективы создания водородных заправочных станций // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ Нацразвитие, 28–30 марта 2022 г. Санкт-Петербург. Санкт-Петербург: «Нацразвитие», 2022. С. 144-146.

Авторы публикации

Чичиров Андрей Александрович – д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия и водородная энергетика» (ХВ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), ORCID 0000-0002-9116-0370, khimiya_kgeu@mail.ru.

Разакова Регина Иршатовна – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), ORCID 0009-0002-1732-3335, reginarazakova@yandex.ru

Гайнутдинов Фарит Ринатович – магистрант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), ORCID 0009-0006-0381-1345, EBKKK@yandex.ru.

Гайнутдинова Диляра Фаритовна – канд.хим.наук, доцент кафедры «Химия и водородная энергетика» (ХВ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), ORCID 0009-0000-7477-9860, gaynutdinova2018@bk.ru

References

- 1 Robles I.J.O, Almaraz S.D-L, Pantel CA Hydrogen as a Pillar of the Energy Transition. *Hydrogen Supply Chains. Academic Press*. 2018; (1): 3-35. doi: 10.1016/B978-0-12-811197-0.00001-4.
2. Filimonova AA, Chichirov AA, Chichirova ND, et al. Sovremennye napravleniya razvitiya vodorodnyh jenergeticheskikh tehnologij. *Nadezhnost' i bezopasnost' jenergetiki*. 2019; 12(2): 89-96. (In Russ).
3. Filimonov AG, Filimonova AA, Chichirova ND, et al Global energy association: new opportunities of hydrogen technologies. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021; 23(2): 3-13. (In Russ). doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-2-3-1. (In Russ).
4. Ahmeda Adeel, QuasemAl-Aminb Abul, Ambrosea Angelina F., Saidurc R. Hydrogen fuel and transport system: A sustainable and environmental future. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016; (41):1369-1380.
5. Filimonova AA, Chichirov AA, Chichirova ND, et al Electrochemical Technologies for Hydrogen Fuel Vehicles. *News of Higher Educational Institutions. Energy Issues*. 2021; 23(2):104-115. (In Russ).
6. Joydev M. Chapter 7.2 - Overview on application of hydrogen. *Towards Hydrogen Infrastructure*. 2024; 401-430. doi: 10.1016/b978-0-323-95553-9.00006-6.
7. Alazemiab IJ, Andrews J. Automotive hydrogen fuelling stations: An international review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015; (48): 483-499.
8. Pang Y, Martinez YA, Hydrogen refueling stations/infrastructure. *Fuel Cells for Transportation*. 2023; 18:575-597.
9. Dudnik AN., Melakh VG. Hydrogen Filling Stations. *Ecotechnologies and Resource Saving*. 2007; (4): 3-12.
10. Reddi K, Elgowainy A, Rustagi N, et al. Impact of hydrogen refueling configurations and market parameters on the refueling cost of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017; 42(34):21855–21865. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.05.122
11. Rose PK, Neumann F. Hydrogen refueling station networks for heavy-duty vehicles in future power systems. *Environ*. 2020; (83): 102358. doi: 10.1016/j.trd.2020.102358.
12. Genovese I.M, Fragiaco P. Hydrogen refueling station: overview of the technological status and research enhancement. *Energy Storage*. 2023; 61:106758.
13. Fieseler H, Hettinger W, Kesten M. On-board fuel storage and supply system of a liquid hydrogen powered experimental passenger car. *Proceedings of the Twelfth International Cryogenic Engineering Conference Southampton*. UK, 12–15 July 1988(1988). doi: 10.1016/b978-0-408-01259-1.50024-3.
14. Meurer C, Barthels H, Brocke WA. et al. Phoebus – an autonomous supply system with renewable energy: six years of operational experience and advanced concepts. *Energy*. 1999; (67):131-138, doi: 10.1016/S0038-092X(00)00043-8.
15. Tanaka T, Azuma T, Evans JA, et a. Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model. *Energy*. 2007; (32):2162-2170. doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.019.
16. Rosyid OA, Jablonski D, Hauptmanns U. Risk analysis for the infrastructure of a hydrogen economy. *Energy*. 2007; (32):3194-3200. doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.02.012.
17. Molkov V, Kashkarov S. Blast wave from a high-pressure gas tank rupture in a fire: stand-alone and under-vehicle hydrogen tanks. *Energy*. 2015; (40):12581-12603. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.07.001.
18. Shebeko YuN., Bolodyan IA. International Experience in Ensuring Fire Safety of Hydrogen Fueling Stations. *News of Gas Science*. 2022; 2(51):151-158.
19. Pagliaro M, Iulianelli A. Hydrogen Refueling Stations: Safety and Sustainability. *Energy*. 2019; 8-13. doi: 10.13140/RG.2.2.10338.48324.
20. Dodds PE, McDowall W. Review of hydrogen delivery technologies for energy system models. *Uk Shc* 2012; 3-35.
21. Striednig M., Brandstätter S., Sartory M. et al. Thermodynamic analysis of the real gas refueling process. *Energy*. 2014;(39): 8495-8509.
22. Li Z, Pan X, Sun K, et al. Development of safety standard for mobile hydrogen refueling facilities in China. *Energy*. 2014;(39):13935-13939. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.02.017.
23. Elgowainy A, Wang M, Joseck F, et al. Life-cycle analysis of fuels and vehicle technologies. *Encyclopedia of Sustainable Technologies, Elsevier, Oxford*. 2017;317-327.
24. Kurtza J, Sprika S, Bradleyb TH. Review of transportation hydrogen infrastructure performance and reliability. *Review of transportation hydrogen infrastructure performance and reliability*.2019; 44(23):12010-12023.

25. Brown T, Kisting H. Analysis of customer queuing at hydrogen stations. *Energy*. 2022;(47):17107-17120. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.21.
26. Sinigaglia T, Lewiski F, Santos Martins ME, et al. Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications-a review. *Energy*. 2017;(42):24597-24611. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.08.063.
27. Dagdougui H, Sacile R, Bersani C, et al. Hydrogen storage and distribution: implementation scenarios. *Hydrogen Infrastructure for Energy Applications*. 2018; doi: 10.1016/b978-0-12-812036-1.00004-4.
28. New Argonne technology could reduce the cost of hydrogen refueling. *Fuel Cells Bull*. 2018; 14-15. doi: 10.1016/S1464-2859(18)30223-2.
29. Mayer T, Semmel M, Guerrero Morales MA, et al. Techno-economic assessment of liquid or gaseous hydrogen refueling stations. *Energy*. 2019; doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.051.
30. Alexeyeva OK., Kozlov SI, Fateev VN. Hydrogen Transportation. *Transport on Alternative Fuel*. 2011;21(3): 18-24. (In Russ).
31. Grigoriev SA, Korobtsev SV. Electrochemical Hydrogen Compressors/Concentrators Based on Solid Polymer Electrolyte. *Transport on Alternative Fuel*. 2011; 23(5):57-59. (In Russ).
32. Alexeyeva OK., Kozlov SI, Fateev VN. Hydrogen Transportation. *Transport on Alternative Fuel*. 2011; 21(3):18-24. . (In Russ).
33. Losev OG., Maruseva IV., Pushkaryov AS, et al Filling Station on Renewable Energy Sources for Hydrogen and Electric Transport. *Transport on Alternative Fuel*. 2013; 33(3):15-18. (In Russ).
34. Wen S, He G. Review of hydrogen station technology development through patent analysis. *Clean Energy*. 2018; (2):29-36, doi: 10.1093/ce/zky006.
35. Chikunov GV, Gaynutdinov FR. Hydrogen Fueling Stations - Operating Mode. *Energy-2022. Thermal Power Engineering: The Seventeenth All-Russian (Ninth International) Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. 11–13 May 2022; Ivanovo, Russia*. Ivanovo: ISPU, 2022. p. 87 (In Russ).
36. Ali MS, Khan M. SH, Tuhin RA, et al. Challenges of hydrogen storage and transportation: A review of recent advancements. *Hydrogen Energy Conversion and Management*. 2024; 255-287.
37. Abdin Z, Tang C, Liu Y, et al. Catchpole Current status and challenges of hydrogen storage technologies. *Towards Hydrogen Infrastructure. Elsevier*. 2024;101-132.
38. Zhao T, Liu Z. Investment in hydrogen refueling station based on compound real options. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;(57):198-209.
39. Makuieva DA, Razakova RI. The State and Prospects of Hydrogen Filling Stations Implementation. *Tinchurin Readings - 2023 "Energy and Digital Transformation": Proceedings of the International Youth Scientific Conference. In 3 volumes, 26–28 April 202, Kazan, Russia*. Kazan: KGEU, 2023. pp. 118-120. (In Russ).
40. Paster MD., Ahluwalia RK., Berry G, et al. Hydrogen storage technology options for fuel cell vehicles: well-to-wheel costs, energy efficiency, and greenhouse gas emissions. *Energy*. 2011;(36): 14534-14551, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.07.056.
41. Ramensky AYU. Hydrogen as a Fuel: The Subject and Objectives of Standardization. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2015;(1):33-44.
42. Zakirov RN., Chichirova ND., Filimonova AA, et al. Regulatory and Technical Documentation on Industrial Safety in Hydrogen Production // *News of Higher Educational Institutions. Energy Issues*. 2023; 25(5):91-100.
43. Marchi CS, Hecht ES, Ekoto IW, et al. Overview of the DOE hydrogen safety, codes and standards program, part 3: Advances in research and development to enhance the scientific basis for hydrogen regulations, codes and standards. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017; 42(11):7263-7274.
44. Pique S, Weinberger B, De-Dianous V. Comparative study of regulations, codes and standards and practices on hydrogen fuelling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42(11):7429-7439.
45. Rothausen E., Rokni M. Optimization of total energy consumption at cascade refueling stations for hydrogen vehicles. *Energy*.2014;(39):582-592. doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.10.066.
46. Arkharov I.A., Arkharov A.M., Navasardyan E.S. Comparison of Specific Energy Costs in Hydrogen Vapor Recondensation Cycles for Cryogenic Systems of Filling Stations. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2018;(4-6):57-69. (In Russ).
47. Zhua L, Leia G, Gaob J. Research on key influencing factors for site selection of DC microgrid-based hydrogen-electric hybrid refueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023; 48(100):39759-39779. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.07.141.

48. Genovese M, Fragiaco P. Evolution of the hydrogen station towards a polygenerative energy system. *Energy*. 2022; (47):12264-12280. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.110.
49. Serdaroglu G, Huz M, Gillott M, et al. The impact of environmental conditions on the operation of a hydrogen refueling station. *Energy*. 2015;(40):17153-17162, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.05.003.
50. Reddy K, Elgowainy A, Rustagi N, et al. Impact of hydrogen refueling methods SAE J2601 on the refueling time of fuel cell passenger vehicles. *Energy*. 2017;(42):16675-16685. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.04.233.
51. Gye H-R, Seo S-K, Bach Q-V, et al. Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019;44(2):1288-1298.
52. Yegorov AA, Fomin AV. Comparative Analysis of Hydrogen Filling Stations and Automotive Gas Filling Stations. *Current Problems of Fire Safety: Proceedings of the International XXXIV Scientific and Practical Conference dedicated to the 85th anniversary of the formation of the FGBU VNIPO of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Balashikha, 23–24 August 2022*. Moscow: 2022. pp. 708-713. (In Russ).
53. Dmitriev AL, Ikonnikov VK. Hydrogen Filling Station Based on the Installation for Hydrogen Production by Hydrothermal Oxidation of Industrial Aluminum Powders. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2017;(10-12):75-85.
54. Arkharov IA, Arkharov AM, Navasardyan ES. Comparison of Specific Energy Costs in Hydrogen Vapor Recondensation Cycles for Cryogenic Systems of Filling Stations. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2018;(4-6):57-69.
55. Gainutdinova DF. Prospects for the Creation of Hydrogen Filling Stations. *Collection of Selected Articles Based on the Materials of Scientific Conferences of the GNI National Development, 28–30 March 2022, St. Petersburg, Russia*, St. Petersburg: National Development, 2022. pp. 144-146. (In Russ).

Authors of the publication

Andrey A. Chichirov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, ORCID 0000-0002-9116-0370, khimiya_kgeu@mail.ru

Regina I. Razakova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, ORCID 0009-0002-1732-3335, reginarazakova@yandex.ru

Farit R. Gainutdinov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, ORCID 0009-0006-0381-1345, EBKKK@yandex.ru

Dilyara F. Gainutdinova - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, ORCID 0009-0000-7477-9860, gaynutdinova2018@bk.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено 15.02.2024 г.

Отредактировано 27.02.2024 г.

Принято 07.03.2024 г.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 53.096

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-2-166-175

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ РЕЗИНЫ

Павлов Г.И.¹, Ваньков Ю.В.², Теляшов Д.А.^{1,2}, Зайнутдинова Д.А.¹, Мукаддаров А.А.²

¹Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
pavlov16@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Экспериментальным методом оценить степень влияния температуры инертных газов на скорость термического разложения отходов резинотехнических изделий (фрагментов автомобильной покрышки) при их непосредственном контакте. *МЕТОДЫ.* Исследования проводились на испытательном огневом стенде при стационарном режиме движения газов в температурном диапазоне от 300 °С до 500 °С. Исходная масса резины составляла 4 грамма. Термическое разложение резины осуществлялось за счет тепловой энергии инертного газа, выделяющейся при сжигании пропана - бутановой смеси с воздухом при $\alpha = 1,1 \dots 1,15$. Расходы топлива и окислителя оставались постоянными, изменение температуры газов осуществлялось теплообменом горячих газов и воды в теплообменнике. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описаны: методика проведения экспериментов, исследуемый объект исследования, а также приведены результаты исследований и их анализ. В качестве основных параметров исследования были выбраны: скорость уменьшения массы резины от температуры газов, предельное значение температуры газов, при котором сера в твердом виде остается в разложившейся части резины. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Установлено, что с повышением температуры инертного газа, скорость процесса термического разложения резины возрастает. При нахождении резины в газовой среде в диапазоне температур от 450 °С до 500 °С содержание серы в твердом остатке практически остается неизменным. Средняя скорость протекания пиролиза равнялась 0,02 кг/ч, что в 6 раз больше скорости пиролиза в реторте (0,003 кг/ч).

Ключевые слова: *резинотехнические изделия; температура термического разложения; масса; время процесса; стационарный режим; инертный газ; вредные вещества.*

Благодарности: *Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена по Государственному контракту от 16 января 2023 г. №075-03-2023-291/1 в рамках РНФ «Умные наноматериалы для повышения энергоэффективности».*

Для цитирования: Павлов Г.И., Ваньков Ю.В., Теляшов Д.А., Зайнутдинова Д.А., Мукаддаров А.А. Экспериментальное исследование влияния температуры инертных газов на интенсивность термического разложения резины // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 166-175. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-166-175.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF THE TEMPERATURE OF INERT GASES ON THE INTENSITY OF THERMAL DECOMPOSITION OF RUBBER

Pavlov G.I.², Vankov Y.V.¹, Telyashov D.A.^{1,2}, Zaynutdinova D.A.², Mukatdarov A.A.²

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia
pavlov16@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* An experimental method is used to evaluate the effect of the temperature of inert gases on the rate of thermal decomposition of waste rubber products (fragments of a car tire) upon their direct contact. *METHODS.* The research was carried out on a test firing stand at a stationary mode of gas movement in the temperature range from 300 °C to 500 °C. The initial weight of the rubber was 4 grams. The thermal decomposition of rubber was carried out due to the thermal energy of inert gas released during the combustion of a propane-butane mixture with air at $\alpha = 1.1...1.15$. The consumption of fuel and oxidizer remained constant, the change in gas temperature was carried out by heat exchange of hot gases and water in the heat exchanger. *RESULTS.* Metodology of conducting experiments, the object of research under the study, results of the research and their analysis are described in the article. The main parameters were selected: the rate of decrease in rubber mass depending on the temperature of the gases, the limiting value of the gas temperature at which sulfur in solid form remains in the decomposed part of the rubber. *CONCLUSION.* It was found that with increasing temperature of the inert gas, the rate of thermal decomposition of rubber increases. When rubber is in a gaseous environment in the temperature range from 450 °C to 500 °C, the sulfur content in the solid residue remains practically unchanged. The average rate of pyrolysis was 0.02 kg/h, which is 6 times higher than the rate of pyrolysis in the retort (0.003 kg/h).

Keywords: rubber products; thermal decomposition temperature; mass; process time; stationary mode; inert gas; harmful substances.

Acknowledgments: The work was carried out under the State Contract dated January 16, 2023 No. 075-03-2023-291/1 within the framework of the RSF "Smart nonmaterial's for increasing energy efficiency."

For citation: Pavlov G., Vankov Y.V., Telyashov D.A., Zaynutdinova D.A., Mukatdarov A.A. Experimental study of the effect of the temperature of inert gases on the intensity of thermal decomposition of rubber. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (2): 166-175. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-166-175.

Введение (Introduction)

Утилизации изношенных автомобильных покрышек и, вообще в целом, резинотехнических изделий, которые выработали свой ресурс, по-прежнему остается актуальной проблемой. Наиболее простым решением является их использование в качестве строительного или декоративного материала без переработки [1]. Но ввиду низкой эффективности, решить данную проблему таким образом удастся не более, чем на 10%. К тому же в 2021 году был издан закон, согласно которому использовать изношенные шины без переработки в качестве строительного материала запрещается [1-3]. В настоящее время изношенные шины в строительстве используют исключительно в виде резиновых крошек [2,3].

При утилизации шин наиболее широко применяется метод пиролиза. Данный метод позволяет получить ряд продуктов такие, как: технический углерод, пиролизный газ, прессованный металлокорд, синтетическая нефть [4-18]. Пиролиз может быть высокотемпературным и низкотемпературным. При высокотемпературном пиролизе процесс разложения материала протекает в температурных условиях 1000 °C...1400 °C, а при низкотемпературном - 400 °C ... 900 °C. Высокотемпературный пиролиз имеет такие преимущества как: высокий распад диоксинов (если есть сопутствующие их образованию вещества), плавление тяжелых металлов, максимальная газификация резинотехнических изделий. Отрицательные аспекты: образование сложных и ядовитых химических соединений, высокие экономические затраты на обеспечение процесса и, трудность обеспечения надежной работы энергоустановки (материал камеры пиролиза должен выдерживать высокие температуры). Наиболее предпочтительным является низкотемпературный пиролиз, который можно реализовать на простых и недорогих установках. Установки низкотемпературного пиролиза имеют два существенных недостатка: низкую производительность; цикличность процесса. Низкая производительность обусловлена тем, что нагрев отходов происходит в замкнутом объеме через стенки реторты. При таких условиях время нагрева перерабатываемого материала до температуры разложения может достигать от 5 до 12 часов. В России были попытки создания установок низкотемпературного пиролиза, в которых нагрев материала осуществлялся газами непосредственным контактом, в качестве которых использовались

продукты сгорания богатые горючими элементами, часто, продукты сгорания самой резины. Но они не нашли широкого применения из-за неудовлетворительных эксплуатационных характеристик и низких экологических показателей. В связи с этим, в основном, на предприятиях сбора хранения и переработки резины используются установки ретортного типа (Фортран, Т-ПУ-1). Это, несмотря на ее существенные недостатки, которые были отмечены выше. Перспективным представляется прямая передача тепла от нагретых газов к перерабатываемому материалу, если в качестве теплоносителя использовать инертные газы со стабильными термодинамическими параметрами, образующиеся при сжигании углеводородных топлив, в том числе пиролизных газов. Нагрев перерабатываемого материала газами с регулируемыми параметрами является более выигрышным, чем через стенку. Такой механизм широко используется в различных химических технологиях, где организовано строгое управление параметрами газов и содержанием концентрации окислителей. Большая часть отходов резины содержит серу, которая в чистом виде начинает кипеть при температуре 400 °С и более. Испаренная сера в присутствии паров воды может образовывать сернистую и серную кислоты. Это значение определяет максимально допустимый температурный уровень инертных газов. Как уже отмечалось выше, несмотря на очевидные преимущества, технологии пиролиза, в которых инертные газы напрямую взаимодействуют с твердыми углеводородсодержащими отходами, промышленностью не выпускаются. К одной из причин, как показывают результаты литературного обзора, следует отнести недостаточную научную базу [4,5,8,10,11,13]. По разложению резины в нагретой среде опубликовано достаточное количество работ. Например, в работе [18] авторы исследовали состав пиролизных газов при температуре нагрева резины до 450 - 500 °С. В работе [15] приведены результаты детальных исследований термического разложения резины в широком диапазоне температур - от 260 °С до 525 °С. Установлено, что наиболее интенсивно резина разлагается при температурах 375 °С ... 400 °С. Аналогичные результаты получены авторами работ [4, 5, 8]. Замечено, что при дальнейшем повышении температуры резины до 600-650 °С выход летучих резко снижается и пиролиз резины, практически, приостанавливается. Авторами работ [6, 18] выявлено, что на предельных температурах образуются вредные вещества, которые негативно сказываются на экологические параметры процесса пиролиза. Такие же результаты получены и зарубежными авторами [4-8, 10-13]. Из анализа вышеназванных работ следует, что в составе пиролизных газов и жидкостей, получаемых из резины, может присутствовать сера и ее производные. В работе [9] авторы теоретически обосновали, что оптимальным температурным уровнем для скорости протекания пиролиза резины является 430 °С, при котором содержание серы в продуктах минимально. В приведенных статьях отмечено, что эксперименты по пиролизу резины проводились в замкнутых объемах, т.е. нагрев разлагаемого материала осуществлялся через стенку. Крайне редки работы научного характера по пиролизу резины нагретыми инертными газами.

Цель работы заключалась в получении новых данных по низкотемпературному пиролизу резины инертными газами, в качестве которых использовались продукты сгорания пропана и, сравнении их с результатами, полученными в ретортах. При проведении исследований решались следующие научные задачи:

- 1) установление зависимости уменьшения массы резины от времени воздействия инертных газов при разных значениях температур;
- 2) определение влияния температуры инертных газов на содержание серы в твердом остатке.

Материалы и методы (Materials and methods)

Исследование проводились на резине одного и того же типа и при начальных параметрах, близких к друг другу (начальная масса, температура, влажность). Метод исследований - экспериментальный на лабораторном стенде. Схема стенда приведена на рисунке 1.

Общий вид лабораторного стенда показан на рисунке 2. Основной частью стенда является рабочий участок, включающий в себя: камеры сгорания и пиролиза, теплообменник. Камера сгорания 3 представляет собой круглую цилиндрическую трубу, в нижней части которой расположены газовый коллектор 1 и искровая свеча зажигания 2. К верхней части камеры сгорания присоединен теплообменник 6, выполненный по схеме трубу в трубе. В теплообменник 6 вмонтирована камера пиролиза 5, внутри которой располагается тигль 8 с исследуемым веществом (резиной).

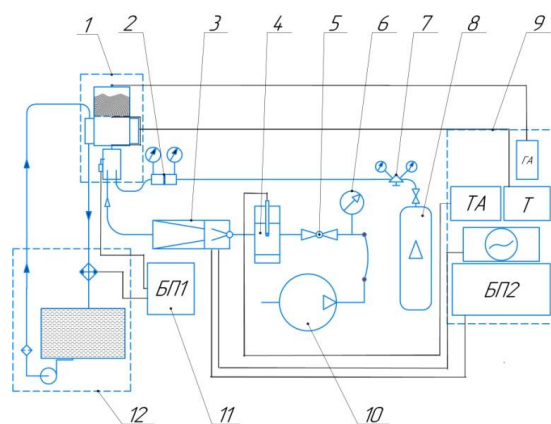


Рис. 1. Схема лабораторного стенда: 1 – рабочий участок; 2 – измерительный участок; 3 – пульсатор; 4 – камера Эйфеля; 5 – кран; 6 – манометр; 7 – редуктор; 8 – газовый баллон; 9 – измерительная система; 10 – компрессор; 11 – блок питания; 12 – система охлаждения
*Источник: Составлено авторами

Fig. 1. The scheme of the test firing stand: 1 – working section; 2 – measuring section; 3 – pulsator; 4 – Eiffel chamber; 5 – crane; 6 – pressure gauge; 7 – reducer; 8 – gas cylinder; 9 – measuring system; 10 – compressor; 11 – power supply; 12 – cooling system
Source: compiled by the author.

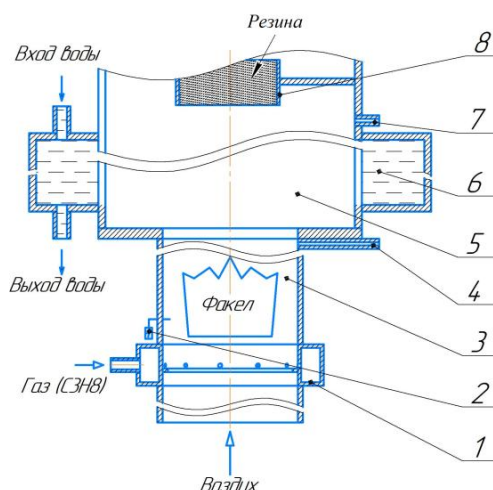


Рис. 2. Схема рабочего участка: 1 – газовый коллектор; 2 – свеча зажигания; 3 – камера сгорания; 4,7 – два технологических штуцера; 5 – камера пиролиза; 6 – теплообменник; 8 – тигль с резиной
*Источник: Составлено авторами

Fig. 2. Technical diagram of the pyrolysis chamber with the object of study: 1 – gas collector; 2 – spark plug; 3 – combustion chamber; 4 – measuring socket; 5 – pyrolysis chamber; 6 – heat exchanger; 7 – measuring socket; 8 – crucible with rubber
Source: compiled by the author.

Лабораторный стенд работает следующим образом. Включается компрессор 10 (Рис. 3), который нагнетает воздух в ресивер. После достижения давления сжатого воздуха установленного значения, которое контролируется манометром 6, компрессор выключается.

Воздух на рабочий участок подается открыванием вентиля 5, а скорость воздушного потока контролируется термоанемометром, датчик которого установлен в камере Эйфеля 4. Воздушный поток направляется на рабочий участок 1 через пульсатор 3, который предназначен для создания упорядоченных турбулентных пульсаций в потоке газа. Такой режим подачи воздуха обеспечивает сжигание пропано-воздушной смеси на коротком участке за счет интенсификации смешения. В опытах расход воздуха поддерживался постоянным, который контролировался по скорости потока воздуха в камере Эйфеля - 0,05 м/с. Пропан-бутановая газовая смесь подавалась из баллона 8. Необходимый расход топлива устанавливался по перепаду давления перед шайбой, который регулировался редуктором 7. Топливо-воздушная смесь поджигалась свечой зажигания 2 (Рис. 2). Горение пропано-воздушной смеси происходило в пульсирующем режиме с коэффициентом избытка воздуха, близким к 1, благодаря чему горение смеси завершалось в камере сгорания. Далее, продукты сгорания горючей смеси с заданной

температурой, в которых концентрация кислорода практически равнялась нулю (контролировалась газоанализатором), направлялись в камеру пиролиза. Стенд позволял изменять температуру продуктов сгорания в пределах от 300 °С до 500 °С благодаря системе охлаждения 12 (Рис. 1), включавшей в себя: водяной насос, фильтр, бак воды, охладитель и теплообменник типа «труба в трубе». Температура продуктов сгорания контролировалась термопарой, установленной в технологический штуцер 7. В экспериментах расход топлива составлял 0.452 кг/ч, коэффициент избытка воздуха поддерживался на уровне 1,0 (0.98...1,02) и контролировался газоанализатором «Testo 340». Концентрация оксида углерода и оксидов азота составила 30 ppm и 20 ppm соответственно. На стенде необходимые параметры регистрировались измерительной системой 9 (Рис. 1), состоящей из: осциллографа, термоанемометра, термометра, газового анализатора и блока питания с возможностью регулировки выходного напряжения для изменения частоты пульсатора.



Рис. 3 Общий вид лабораторного стенда:
1 – камера пиролиза; 2 – теплообменник;
3 – камера сгорания; 4 – пульсатор; 5 – камера
Эйфеля; 6 – бак с водой; 7 – газовый баллон с
редуктором; 8 – водяной насос; 9 – охладитель;
10 – блок питания; 11 – осциллограф; 12 –
термоанемометр; 13 – термометр; 14 –
газоанализатор

*Источник: Составлено авторами

Fig. 3. General view of the experimental firing stand:
1 – pyrolysis chamber; 2 – heat exchanger; 3 –
combustion chamber; 4 – pulsator; 5 – eiffel
chamber; 6 – water tank; 7 – gas cylinder with
gearbox; 8 – water pump; 9 – cooler; 10 – power
supply; 11 – oscilloscope; 12 – thermocouple;
13 – thermometer; 14 – gas analyzer

Source: compiled by the author.

Объектом исследования являлся фрагмент автомобильной шины, показанный на рисунке 4.



Рис.4. Объект исследования (фрагмент автомобильной шины)

Fig. 4. The object of the study (sliced car tire)

*Источник: Составлено авторами

Source: compiled by the author.

Перед экспериментами подготавливалась опытная партия испытуемых веществ, в данном случае, резины. Нарезанные куски резины подгонялись по массе с точностью до $\pm 0,3$ г, для чего были использованы электронные весы «САРТОГОСМ ВЛТ-150-П». Масса

тигля составляла $75 \text{ г} \pm 0,3 \text{ г}$, масса тигля с резиной $79 \text{ г} \pm 0,3 \text{ г}$. В экспериментах резина помещалась в тигль, расположенной в камере пиролиза (Рис.2)

Эксперименты проводились при следующих температурах газов: 300, 350, 400, 450 и 500 °С. Эти значения были выбраны в соответствии с рекомендованными в литературе данными. Контроль начала и окончания процесса пиролиза определялся по коэффициенту прозрачности газового потока. Количественным параметром прозрачности являлся коэффициент ослабления света, определяемый оптическим дымомером ДО-1 путем просвечивания газового потока на выходе из трубы стенда.

Началом процесса пиролиза считалось изменение показания на шкале прибора, а окончанием – показание стабильных значений. Для предотвращения механического уноса тигль изготавливался из мелкоячеистой металлической сетки. Конструкция тигля представляла собой цилиндр с закрытыми торцевыми стенками. После завершения процесса пиролиза тигль вынимался из камеры пиролиза и взвешивался повторно. Разница в массах принималась за количество легких фракций, удаленных из резины в результате пиролиза. Для каждого значения температуры газов эксперименты проводились не менее пяти раз. Твердые остатки из тигля пересыпались в пластиковую пробирку, где путем перемешивания усреднялся их состав (при одном и том же значении температуры). В дальнейшем, они отправлялись в сертифицированную лабораторию «Наноаналитика» г. Казань для определения в них содержания элементарной серы. Для обеспечения стабильных значений температуры инертных газов в камере пиролиза лабораторный стенд перед проведением пиролиза выводился на регулярный режим работы, т.е. на такой режим, при котором при фиксированных значениях параметров, влияющих на температуру газов, температура газов оставалась постоянной и равнялась одному из принятых значений: 300, 350, 400, 450 и 500 °С. Время выхода стенда на регулярный режим в зависимости от заданной температуры газов составляло от 12 до 18 минут. Температура газов одновременно с концентрацией кислорода воздуха измерялись в зоне расположения тигля. После установления регулярного режима тигль помещался в камеру пиролиза и начинался контроль двух параметров: температуры газов и коэффициента преломления света в приборе. Отсчёт времени процесса разложения резины начинался по началу изменения значения коэффициента преломления света в газовых продуктах пиролиза.

Для получения данных по ретортной технологии использовался закрытый тигель с отверстием. Масса навески резины составляла также 4 г. Стенки тигля нагревались электрическим напряжением постоянного тока. Температура стенки поддерживалась постоянной, равной 500 °С. Время окончания пиролиза резины определялось по изменению массы тигля с резиной, которая практически оставалась постоянной через 30...35 минут.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

На рисунке 5 приведены графические зависимости изменения средней температуры газов в зоне расположения тигля от продолжительности процесса пиролиза. Из графиков видно, что чем больше температура инертного газа, тем за меньшее время заканчивается пиролиз резины. На имеющихся графиках наименьшее время протекания пиролиза соответствует температуре газов, равной 500 °С, наибольшее время – температуре газов с температурой 300 °С. Интересно наблюдать за характером изменений значений температур от времени. Видно, что вначале пиролиза температура инертных газов падает. Далее, температура газов постепенно начинает расти и через 9...11 минут, в зависимости от первоначально заданной температуры, стабилизируется. Следует отметить, что такое изменение температуры в процессе пиролиза характерно для всех режимов.

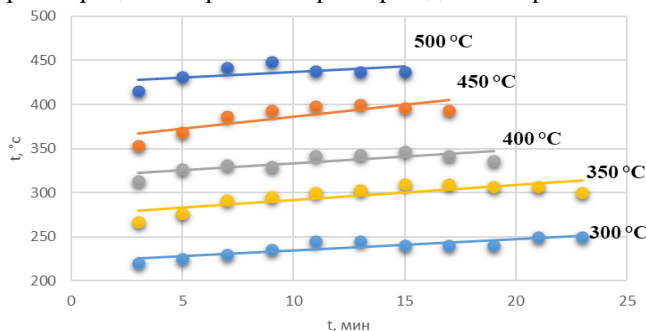


Рис. 5. График изменения температуры газов в зоне расположения тигля в процессе пиролиза

*Источник: Составлено авторами

Fig. 5. Graph of gas temperature changes in the crucible location area during pyrolysis

Source: compiled by the author

Это можно объяснить потерей части тепла газового потока на процессы термического разложения резины. По экспериментальным данным была построена зависимость уменьшения массы резины от полного времени протекания процесса пиролиза (Рис. 6) для заданных температур газов.

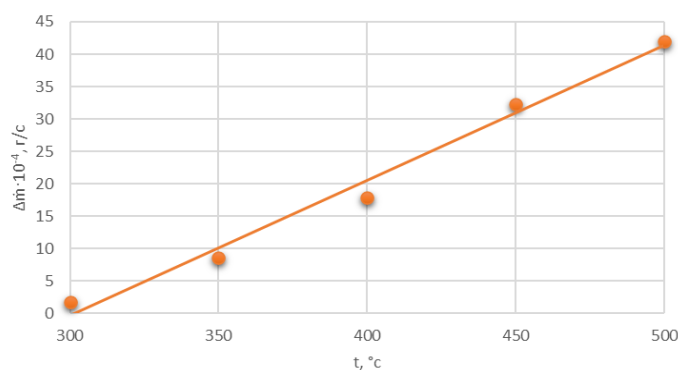


Рис. 6. График зависимости уменьшения массы резины от полного времени протекания процесса пиролиза для заданных температур инертных газов

*Источник: Составлено авторами

Fig. 6. A graph of the dependence of the decrease in the mass of rubber on the total time of the pyrolysis process for the specified temperatures of inert gases

Source: compiled by the author

Из полученного графика видно, что наибольшее уменьшение массы резины наблюдается при пиролизе, протекающем на более высоких температурах 450 °C ... 500 °C. При таких температурах убыль массы составляла от 2,3 до 2,5 г. или примерно (60 ... 63)% от исходной массы. При температуре 300 °C термическому разложению подвергается только лишь около 5% резины по массе. Твердый остаток, полученный пиролизом резины при разных температурных режимах, по структуре также отличается друг от друга. Образцы твердых остатков приведены на рисунке 7.



Рис. 7. Образцы твердых остатков после пиролиза резины

*Источник: Составлено авторами

Fig. 7. Samples of rubber products after thermal decomposition depending on different temperature conditions

Source: compiled by the author

Структура твердого остатка, полученная при температуре пиролиза равной 500 °C, хрупкая и при приложении небольших усилий легко разрушается. Иную структуру имеют твердые остатки, образовавшиеся при пиролизе резины на низких температурах газов. Например, при температуре газов равной 300 °C в твердом остатке содержатся фрагменты неразложившейся резины. Для сравнения, общая картина полученных образцов приведена на рисунке 8.

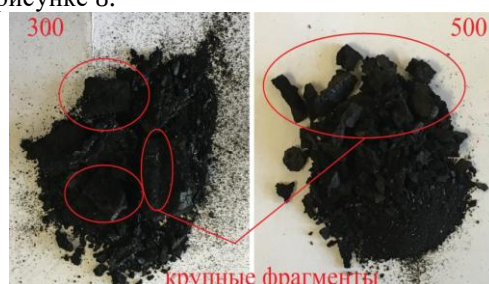


Рис. 8. Образцы твердых остатков пиролиза резины

*Источник: Составлено авторами

Fig. 8. Fragments of rubber at different temperatures of thermal decomposition

Source: compiled by the author

При решении практических вопросов очень важно знать, какое количество элементарной серы остается в твердом остатке в зависимости от температурных условий протекания пиролиза. Концентрация элементарной серы в исходной резине и в твердых остатках определялась на абсолютно сухую навеску (% масс.) на элементном анализаторе СКIC 5E -CHN2200 с инфракрасным модулем SE-IRSII. Результаты элементного анализа приведены в таблице. В исходных образцах содержание элементарной серы составляло около 1 % на абсолютно сухую навеску (% масс.)

Таблица
Table

Содержание элементарной серы S в твердом остатке
Elemental sulphur S content in solid residue

№ п/п	Температура инертного газа, °C	Концентрация элементарной серы S на абсолютно сухую навеску, % масс
1	300	0,845
2	350	1,125
3	400	0,910
4	450	0,775
5	500	1,110

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из таблицы видно, что при нагреве резины инертными газами до температуры 500 °C концентрация серы в композите практически не меняется. Наблюдающиеся отклонения в значениях находятся в пределах погрешности измерения элементного анализатора, которая составляет $\pm 0,3$ %.

Выводы (Conclusions)

1. Разработан лабораторный стенд для термического разложения углеводородных твердых веществ в инертной высокотемпературной газовой среде с управляемыми параметрами.

2. Наибольшая скорость протекания пиролиза резины соответствует температурам инертных газов 450 500 °C. Средняя скорость протекания пиролиза равнялась 0,02 кг/ч, что в 6 раз больше скорости пиролиза в реторте (0,003 кг/ч). Следует отметить важный факт, что при таких температурах инертных газов концентрация элементарной серы в твердом остатке практически не меняется - концентрация серы в отработавших газах минимальна.

3. Построен график изменения температуры газов в зоне расположения тигля в процессе пиролиза, который имеет линейный характер. Установлено, что при непосредственном контакте нагретых газов с резиной независимо от их первоначальной температуры газы вначале остывают, а потом их температура восстанавливается - время восстановления до первоначального значения совпадает со временем окончания процесса пиролиза.

4. Построена зависимость изменения массового расхода резины от температуры инертных газов.

Литература

1. <https://shinburg.ru/piroliznyy-kotel-dlya-reziny/> [ссылка активна на 31.05.2023]
2. <https://saining-v-permi.ru/oborudovanie/piroliznyj-kotel-na-pokryshkah.html> [ссылка активна на 31.05.2023]
3. Виноградов Р.А., Комков В.И. Оценка экологической безопасности при осуществлении пиролиза автомобильных шин // Студенческий научный форум. 2022. 5с.
4. Deinma T. Dick., Oluranti Agboola., Augustine O. Ayeny. Pyrolysis of waste tyre for high-quality fuel products: A review // AIMS Energy. 2020. V. 8(5). P. 869-895.
5. Julius I. Osayi., Sunny Iyuke., Samuel E. Ogbeide. Biocrude Production through Pyrolysis of Used Tyres // Hindawi Journal of catalysts. 2014. V. 2014. P. 1 – 9.
6. C. Roy., A. Chaala., H. Darmstadt. The vacuum pyrolysis of used tires End-uses for oil and carbon black products // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 1999. V. 51. P. 201-221.
7. Adela Cizkova., Dagmar Juchelkova. Comparison of yield of tires pyrolysis in laboratory and pilot scales // GeoScience Engineering. 2009. V. LV2009. No.4. P. 60-65.
8. Ali Alsaleh., Melanie L. Sattler. Waste Tire Pyrolysis: Influential parameters and Product Properties // Curr Sustainable Renewable Energy Rep. 2014. V. 1. P. 129-135.

9. Boris Samarskiy. Analysis of modernization of tire recycling machine for improvement of environmental sustainability and feasibility // Degree Program in Environmental Engineering. 2014. P. 1-70.
10. Kirill Larionov., Konstantin Slyusarskiy., M.V. Kirgina., et al. Liquid Hydrocarbons Production by the Steam Pyrolysis of Used Tires: Energy Characteristics and Environmental Sustainability // 2022. V. 13. P. 2233-2251.
11. N. Nkosi., E. Muzenda., J. Gorimbo., et al. Developments in waste tyre thermochemical conversion processes: gasification, pyrolysis and liquefaction // Royal Society of chemistry. 2021. V. 11. P. 11844-11871.
12. Samuel Ayodele Iwarere., Ntandoyenkosi Malusi Mkhize. Pyrolysis of various tyre types: characteristics and kinetic studies using thermogravimetric analysis // Multidisciplinary Journal for 13. Waste. 2020. V. 9. P. 165-173.
13. Дорохов В.В., Антонов Д.В., Няшина Г.С., и др. Характеристики термического разложения перспективных жидких биотоплив // XXXVIII Сибирский теплофизический семинар. 2022. №38. С. 77.
14. Новичков Ю.А., Петренко Т.В., Братчун В.И. Исследование процесса бескислородного пиролиза изношенных автомобильных шин // Вестник ХНАДУ. 2005. 3с.
15. Макаров А.В. Некоторые аспекты рециклинга изношенных автомобильных покрышек методом пиролиза // Вестник ТОГУ. 2008. № 1(8). С. 247-258.
16. Чич Саида Кимовна. Пиролиз как оптимальный метод утилизации отработанных автомобильных шин // Новые технологии. 2009. №3. 5с.
17. Фатьянов В.С., Черников Д.В., Арестов О.В. Проблемы утилизации автомобильных шин в Приморском крае и в России // Новые импульсы развития: вопросы научных исследований. 2020. С. 100-113.
18. Павлов Г.И., Кочергин А.В., Ситников О.Р., и др. Переработка изношенных шин и резинотехнических изделий в инертную крошку при использовании установок пульсирующего горения // Вестник казанского технологического университета. 2011. С. 174-179.
19. <https://shinburg.ru/kompanii-po-utilizatsii-shin/> [ссылка активна на 31.05.2023].

Авторы публикации

Павлов Григорий Иванович – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Специальные технологии в образовании» (СТвО) Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ). pavlov16@mail.ru

Ваньков Юрий Витальевич – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). yvankov@mail.ru

Теляшов Дмитрий Александрович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). assaulttelov@mail.ru

Зайнутдинова Динара Айдаровна – аспирант Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ). zajnutdinova-dinara@mail.ru

Мукаддаров Алик Альбертович – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). A.Mukatdarov@abdev.ru

References

1. <https://shinburg.ru/piroliznyy-kotel-dlya-reziny/> [the link is active on 31.05.2023].
2. <https://saining-v-permi.ru/oborudovanie/piroliznyj-kotel-na-pokryshkah.html> [the link is active on 31.05.2023].
3. Vinogradov R.A., Komkov V.I. Assessment of environmental safety in the implementation of pyrolysis of automobile tires // *Student Scientific Forum*. 2022. 5s.
4. Deinma T. Dick., Oluranti Agboola., Augustine O. Ayeny. Pyrolysis of waste tyre for high-quality fuel products: A review // *AIMS Energy*. 2020. V. 8(5). P. 869-895.
5. Julius I. Osayi., Sunny Iyuke., Samuel E. Ogbeide. Biocrude Production through Pyrolysis of Used Tyres // *Hindawi Journal of catalysts*. 2014. V. 2014. P. 1 – 9.
6. C. Roy., A. Chaala., H. Darmstadt. The vacuum pyrolysis of used tires End-uses for oil and carbon black products // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1999. V. 51. P. 201-221.

7. Adela Cizkova., Dagmar Juchelkova. Comparison of yield of tires pyrolysis in laboratory and pilot scales // *GeoScience Engineering*. 2009. V. LV2009. No.4. P. 60-65.
8. Ali Alsaleh., Melanie L. Sattler. Waste Tire Pyrolysis: Influential parameters and Product Properties // *Curr Sustainable Renewable Energy Rep*. 2014. V. 1. P. 129-135.
9. Boris Samarskiy. Analysis of modernization of tire recycling machine for improvement of environmental sustainability and feasibility // *Degree Program in Environmental Engineering*. 2014. P. 1-70.
10. Kirill Larionov., Konstantin Slyusarskiy., M.V. Kirgina., et al. Liquid Hydrocarbons Production by the Steam Pyrolysis of Used Tires: Energy Characteristics and Environmental Sustainability // 2022. V. 13. P. 2233-2251.
11. N. Nkosi., E. Muzenda., J. Gorimbo., et al. Developments in waste tyre thermochemical conversion processes: gasification, pyrolysis and liquefaction // *Royal Society of chemistry*. 2021. V. 11. P. 11844-11871.
12. Samuel Ayodele Iwarere., Ntandoyenkosi Malusi Mkhize. Pyrolysis of various tyre types: characteristics and kinetic studies using thermogravimetric analysis // *Multidisciplinary Journal for 13. Waste*. 2020. V. 9. P. 165-173.
13. Dorokhov V.V., Antonov D.V., Nyashina G.S., et al. Characteristics of thermal decomposition of promising liquid biofuels // *XXXVIII Siberian Thermophysical Seminar*. 2022. No.38. p. 77.
14. Novikov Yu.A., Petrenko T.V., Bratchun V.I. Investigation of the process of oxygen-free pyrolysis of worn-out automobile tires // *Vestnik HNADU*. 2005. 3s.
15. Makarov A.V. Some aspects of recycling of worn-out car tires by pyrolysis // *Bulletin of the TOGU*. 2008. No. 1(8). pp. 247-258.
16. Cheech Saida Kimovna. Pyrolysis as an optimal method of recycling used car tires // *New technologies*. 2009. No. 3. 5s.
17. Fatyanov V.S., Chernikov D.V., Aristov O.V. Problems of utilization of automobile tires in Primorsky Krai and in Russia // *New impulses of development: issues of scientific research*. 2020. pp. 100-113.
18. Pavlov G.I., Kochergin A.V., Sitnikov O.R., et al. Recycling of worn tires and rubber products into inert crumbs when using pulsating combustion units Gorenje // *Bulletin of Kazan Technological University*. 2011. pp. 174-179.
19. <https://shinburg.ru/kompanii-po-utilizatsii-shin/> [the link is active on 31.05.2023].

Authors of the publication

Grigoriy I. Pavlov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia.

Yuri V. Vankov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. yvankov@mail.ru

Dmitry A. Telyashov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia; Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia. assaulttelov@mail.ru

Dinara A. Zaynutdinova - Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia. zayjnutdinova-dinara@mail.ru

Alik. A. Mukatdarov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. A.Mukatdarov@abdev.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **21.12.2023 г.**

Отредактировано **28.01.2024 г.**

Принято **09.02.2024 г.**



ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕННИКА ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ СТОЧНЫХ ВОД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Куницкий В.А., Лукин С.В.

Вологодский государственный университет, г. Вологда, Россия

globee@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Авторами исследуется локальная утилизация теплоты сточных вод (в непосредственной близости к месту их образования) на основе теплообменного аппарата. Для подбора рациональных характеристик теплообменника и корректной оценки потенциального энергетического эффекта необходимо учитывать влияние условий эксплуатации устройства (длительность отдельного использования душевой, массовый расход сред, температура нагреваемой воды на входе в теплообменник, температура сред в момент включения устройства). *ЦЕЛЬ.* Цель работы заключается в исследовании зависимости эффективности утилизации теплоты сточных вод от условий эксплуатации теплообменника и выявлении параметров, оказывающих наибольшее влияние на эффект от энергосберегающего мероприятия. *МЕТОДЫ.* На основе верифицированной математической модели тепловой работы утилизационного теплообменника вычисляется распределение температуры внутри потоков нагреваемой и греющей среды во времени (с момента включения и до достижения стационарного режима работы). На основе полученных данных (температуры нагреваемой воды на выходе из теплообменника в каждый момент времени) определяется абсолютная и относительная экономия теплоты при различных условиях эксплуатации. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Рассмотрено влияние нестационарной фазы работы теплообменника на его энергетическую эффективность. Для конкретной конфигурации теплообменника определено время, за которое устройство достигает стационарного режима тепловой работы. Выявлено, что наибольшее влияние на относительную и абсолютную экономию тепловой энергии оказывают такие условия эксплуатации, как массовый расход и температура нагреваемой воды на входе в теплообменник. Наименьшее влияние на энергетический эффект оказывает температура сред в начальный момент времени. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Определены условия эксплуатации, оказывающие наибольшее влияние на эффект от локальной утилизации теплоты сточных вод. Подтверждена необходимость учета данных условий при проектировании теплообменника и выборе его оптимальных параметров.

Ключевые слова: утилизационный теплообменник для сточных вод; утилизация теплоты воды; энергоэффективность систем ГВС; экспериментальное испытание теплообменного аппарата.

Благодарности: Авторы благодарны Департаменту экономического развития Вологодской области за поддержку и содействие развитию научно-исследовательской деятельности в регионе.

Для цитирования: Куницкий В.А., Лукин С.В. Характеристики теплообменника для локальной утилизации теплоты сточных вод при различных условиях эксплуатации // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 176-186. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-176-186.

THE CHARACTERISTICS OF HEAT EXCHANGER FOR LOCAL UTILIZATION OF WASTEWATER HEAT UNDER DIFFERENT OPERATING CONDITIONS

Kunitskiy V.A., Lukin S.V.

Vologda State University, Vologda, Russia

globee@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The authors research the local utilization of wastewater heat (in close proximity to the place of their formation) based on a heat exchanger. To select rational characteristics of the heat exchanger and correctly assess the potential energy effect, it is necessary to take into account the influence of the operating conditions of the device (duration of individual use of the shower, mass flow of heated and heating water, temperature of heated water at the inlet to the heat exchanger, temperature of the flow at the moment the device is turned on). *THE PURPOSE.* The purpose of the work is to research the dependence of the efficiency of wastewater heat utilization on the operating conditions of the heat exchanger and to identify the parameters that have the greatest impact on the effect of energy-saving measures. *METHODS.* Based on a verified mathematical model of the thermal operation of a recovery heat exchanger, the temperature distribution inside the flows of the heated and heating water in time is calculated (from the moment of switching on until reaching a stationary operating mode). Based on the data obtained (the temperature of the heated water at the outlet of the heat exchanger at each point in time), the absolute and relative heat savings are determined under various operating conditions. *RESULTS.* The influence of the non-stationary phase of the heat exchanger operation on its energy efficiency is considered. For a specific heat exchanger configuration, the time required for the device to reach a steady state of thermal operation is determined. It was revealed that the greatest influence on the relative and absolute savings of thermal energy is exerted by such operating conditions as mass flow and temperature of heated water at the entrance to the heat exchanger. The temperature of the flow at the initial moment of time has the least influence on the energy effect. *CONCLUSION.* The operating conditions that have the greatest impact on the effect of local wastewater heat recovery are determined. The need to take these conditions into account when designing a heat exchanger and choosing its optimal parameters has been confirmed.

Keywords: utilization heat exchanger for wastewater; utilization of water heat; energy efficiency of hot water systems; experimental testing of a heat exchanger.

Acknowledgment: The authors are grateful to the Department of Economic Development of the Vologda region for supporting and promoting the development of scientific research activities in the region.

For citation: Kunitskiy V.A., Lukin S.V. The characteristics of heat exchanger for local utilization of wastewater heat under different operating conditions. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (2): 176-186. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-176-186.

Введение (Introduction)

На данный момент в России практически вся сточная вода, образующаяся в жилых и общественных зданиях, а также в помещениях бытового назначения на промышленных объектах, удаляется в канализационные сети без какого-либо полезного использования тепловой энергии, которой она обладает [1].

Существуют разные способы утилизации теплоты сточных вод, различающиеся по объёму утилизируемых стоков (сточные воды, собранные от отдельного водоразборного устройства, группы устройств, целого здания, группы зданий, микрорайона, населенного пункта, агломерации) и по виду используемой техники (кожухотрубные теплообменные аппараты или системы утилизации на основе теплового насоса) [2].

Авторами исследуется локальная утилизация теплоты сточных вод, образующихся в душевой, на основе теплообменного аппарата (ТОА). При помощи ТОА осуществляется предварительный нагрев холодной воды, планируемой к использованию в водоразборном устройстве, на основе отбора теплоты у удаляемых горячих сточных вод [3]. При этом ТОА располагается в непосредственной близости к водоразборному устройству, что обеспечивает теплообмен между средами при максимальном располагаемом температурном напоре. Данный способ имеет самые низкие капитальные, организационные и технические затраты. При этом позволяет отдельному потребителю тепловой энергии (например, домохозяйству) повышать эффективность использования сетей ГВС при сроке окупаемости до двух лет.

Принципиальная схема душевой с децентрализованным обеспечением ГВС и локальной утилизацией стоков представлена на рисунке 1.

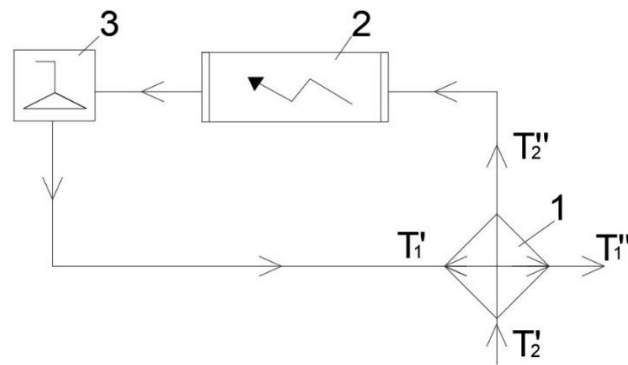


Рис. 1. Принципиальная схема душевой с локальной утилизацией теплоты сточной воды, где 1 – утилизационный теплообменный аппарат; 2 – проточный водонагреватель, 3 – водоразборное устройство (душ), T_2'' – температура нагреваемой воды на входе в ТОА, T_2'' – температура нагреваемой воды на выходе из ТОА, T_1' – температура воды, использующейся в душевой (температура греющей сточной воды на входе в ТОА), T_1'' – температура греющей сточной воды на выходе из ТОА

Fig. 1. Schematic diagram of a shower with local wastewater heat utilization, where 1 – heat exchanger; 2 – instantaneous water heater, 3 – water dispensing device (shower), T_2'' – temperature of the heated water at the inlet to the shower, T_2'' – temperature of the heated water at the outlet from the shower, T_1' – temperature of the water used in the shower (temperature of the heating waste water at the inlet to the shower), T_1'' – temperature of heating waste water at the outlet of the TOA

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Изображение утилизационного теплообменного аппарата в общем виде представлено на рисунке 2.

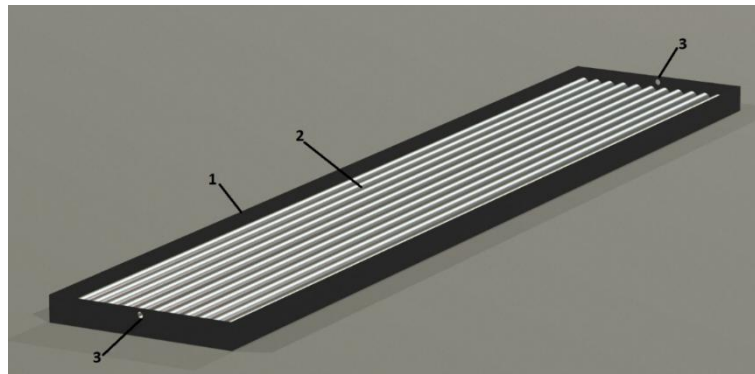


Рис. 2. Схематичное изображение теплообменного устройства, где 1 – корпус ТОУ; 2 – стальные трубы с холодной водой (нагреваемой средой); 3 – отверстия для подачи воды в корпус ТОА (удаления из корпуса)

Fig. 2. Model of the heat exchange device: 1 – heat exchanger housing; 2 – a tube with heated water; 3 – opening for supply/removal of the heating medium from the heat exchanger housing

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

При реализованной на рисунке 1 схеме энергетический эффект от утилизации теплоты сточных вод выражается в снижении требуемой мощности проточного водонагревателя из-за предварительного нагрева холодной воды. Использование такого способа утилизации теплоты стоков возможно и при централизованном ГВС, но с отличием лишь в том, что энергетическим эффектом в данном случае станет снижение необходимого количества горячей воды для использования в душе.

Подобные утилизационные теплообменники, работающие с одним или с группой водоразборных устройств распространены на рынках развитых стран или стран с высокой стоимостью тепловой энергии. На основе мирового опыта развития топливно-энергетических комплексов можно предположить, что и перед Россией со временем встанет задача полезного использования теплоты, теряющейся со сточными водами.

Анализ работ отечественных ученых, посвященных проблеме утилизации теплоты хозяйственно-бытовых стоков, показывает, что данный вопрос рассмотрен подробно и содержательно. Расчет энергетического потенциала, доступного при утилизации хозяйственно-бытовых стоков, на примере конкретного населенного пункта представлен в публикации Бежана А.В. [4]. В работе коллектива авторов Васильева Г.П., Дмитриева А.Н., Абуева И.М., Юрченко И.А. приведена классификация способов утилизации теплоты стоков по объёму утилизируемых сточных вод и по типу используемой техники, а также выделены преимущества и недостатки каждого из рассматриваемых способов [5]. Ученые Кобылкин М.В., Кобылкина А.В., Риккер Ю.О. занимались вопросом разработки малогабаритного рекуператора для утилизации теплоты хозяйственно-бытовых стоков [6]. В работе Владыкиной А.Н. приводятся известные на данный момент способы повышения эффективности энергопотребления общественными и жилыми зданиями [7]. В работе Файзулина А.А. и Мамлеева А.Р. рассматривается способ утилизации сточных вод на основе теплонасосной установки [8]. В исследовании Выборнова Д.В., Удовиченко З.В. и Долгова Н.В. приводятся наиболее часто возникающие проблемы при утилизации теплоты сточных вод [2]. В работе коллектива авторов Юсупова Р.Д., Зиганшина Ш.Г., Политовой Т.О. и Базуковой Э.Р. приводится способ обеспечения горячего водоснабжения на основе солнечной энергии [9]. В работе Запольской И. Н. исследуется взаимосвязь между использованием индивидуальных подогревателей воды домохозяйствами в многоквартирном доме и общим теплопотреблением жилого здания [10].

В работах зарубежных авторов также обстоятельно исследуется проблема утилизации теплоты сточных вод. В публикациях коллектива авторов Sadegh Shahmohammadi, Zoran Steinmann, Henry King, Hilde Hendrickx, Mark A.J. Huijbregts детально рассматриваются особенности эксплуатации душевых среднестатистическим человеком: приводятся данные о значении среднего массового расхода воды в душевой, длительности отдельного использования душевой, количестве приемов душа в день [11]. Новицкая М.П. в научной публикации исследует способ локальной утилизации теплоты сточных вод на основе теплообменного аппарата [12]. В работе Ziwen Liu, Qingxu Huang, Chunyang He, Changbo Wang, Yihang Wang, Kaixin Li исследуется возможность создания цифрового двойника реальной системы теплоснабжения городской агломерации [13]. В исследовании Sitzenfrei R., Hillebrand S. и Rauch W. анализируются преимущества и недостатки централизованных и децентрализованных систем утилизации теплоты хозяйственно-бытовых стоков [14]. В работе Feike F., Oltmanns J., Dammel F., Stephan P. приводится информация по повышению эффективности утилизации теплоты сточных вод на теплонасосной станции путем автоматизации [15]. Коллектив авторов Meireles I., Sousa V., Bleys B. и Poncelet B. в своей работе определяет среднее количество потребляемой горячей воды домохозяйством на основе данных о теплопотреблении нескольких тысяч квартир [16]. Исследователи M.Z. Pomianowski, H. Johra, A. Marszal-Pomianowska, C. Zhang работают над вопросом автоматического управления отдельными водоразборными устройствами, используемыми домохозяйствами, с целью оптимизации времени их работы [17]. Ученые Dmytro Ivanko, Åse Lekang Sorensen, Natasa Nord занимаются вопросом моделирования теплопотребления зданиями с целью прогнозирования необходимого количества теплоты отдельным теплоснабжающим объектом [18].

Как было сказано выше компактные теплообменники для локальной утилизации теплоты стоков распространены на рынках развитых стран или стран с высокими ценами на тепловую энергию. При этом данные устройства представлены в виде серийных изделий разных типоразмеров, отличающихся площадью теплообменной поверхности и, следовательно, потенциальным энергетическим эффектом. Данный подход производителей не учитывает конкретные условия эксплуатации водоразборного устройства, что не позволяет корректно рассчитать энергетический эффект от внедрения энергосберегающего мероприятия, а также способствует выбору устройства с нерациональным типоразмером.

Так как все водоразборные устройства работают в разном режиме и при разных условиях эксплуатации, то актуальна проблема подбора оптимальных параметров утилизационного ТОО для каждого конкретного случая. Подбор рациональных параметров напрямую влияет на энергетическую эффективность устройства, экономический и экологический эффект. Основной особенностью такого теплообменника является то, что он работает только во время использования душевой. В момент включения вода в межтрубном

пространстве и внутри труб имеет одинаковую температуру, равную температуре внутреннего воздуха в помещении. Следовательно, существенную часть времени своей работы устройство работает при нестационарном режиме и данный факт необходимо учитывать для корректного расчета энергетического эффекта.

В данной статье представлены результаты расчета характеристик утилизационного ТОА при разных условиях эксплуатации, полученные на основе авторской верифицированной математической модели тепловой работы ТОА [19].

Цель работы заключается в исследовании зависимости эффективности утилизации теплоты сточных вод от условий эксплуатации ТОА.

Научная значимость исследования состоит в получении закономерностей, описывающих влияние теплофизических и режимных параметров ТОА на количество полезно утилизированной тепловой энергии отдельным теплообменным устройством.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и обосновании расчетно-экспериментальной методики проектирования утилизационных теплообменников на базе использования разработанной математической модели тепловой работы утилизационного ТОА.

Практическая значимость исследования состоит в разработке программного обеспечения для расчета тепловой работы утилизационного ТОА и формулировании рекомендаций для совершенствования систем горячего водоснабжения на основе локальной утилизации теплоты стоков.

К условиям эксплуатации относятся: температура потоков сред в начальный момент времени $T(x, \tau=0)$, °С, условно равная температуре внутреннего воздуха в помещении, в котором располагается ТОА; длительность отдельного использования душевой, τ_0 , с; температура нагреваемой среды на входе в ТОА, $T_2' = t_x$, °С; массовый расход греющей и нагреваемой среды, G , кг/с (в данном случае массовый расход греющей и нагреваемой среды равны) [20].

К характеристикам теплообменника относятся: средняя мощность ТОА в течение отдельного использования душа; количество полезно утилизированной тепловой энергии в течение отдельного использования душевой; относительное снижение требуемой тепловой энергии для работы душевой; тепловая инерция теплообменника (количество времени с момента включения устройства, необходимое для достижения теплообменником стационарного режима работы); средняя мощность ТОА в течение отдельного использования душевой.

Материалы и методы (Materials and methods)

В работе используются следующие методы научного исследования: математическое моделирование тепловой работы утилизационного ТОА с заданными параметрами; абстрагирование (упрощение представления реального процесса теплообмена между двумя средами через стенку трубки); анализ и сравнение полученных расчетным путем характеристик теплообменника при разных условиях эксплуатации.

На основе математического моделирования исследуется тепловая работа ТОА при разных условиях эксплуатации. Результатом расчета являются функции, описывающие распределение температуры внутри нагреваемого и греющего потока в пространстве и времени: $T_2(x, \tau)$ и $T_1(x, \tau)$ соответственно.

В данной статье исследуется утилизационный теплообменник с уже заданными геометрическими и теплотехническими параметрами, представленными в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Технические характеристики ТОУ

Technical characteristics of TUU

Параметр	Расчетное значение параметра
Длина труб, м	2
Количество труб, шт	10
Диаметр трубы, $d_{вн}/d_{н}$, м	0,021 / 0,024
Габариты корпуса ТОА (длина, ширина, высота), м	2 / 0,3 / 0,15
Расчетная площадь поверхности теплообмена, м ²	1,15
Массовый расход греющей и нагреваемой среды, G , кг/с	0,1; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18
Температура нагреваемой среды на входе в ТОУ, t_r , °С	5; 10; 15; 20
Температура греющей среды на входе в ТОУ, t_x , °С	40
Температура потоков сред в начальный момент времени $T(x, 0)$	18; 20; 22; 24
Длительность отдельного использования душевой, τ_0 , с	420

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Результаты (Results)

На рисунке 3 представлено распределение температуры внутри потока нагреваемой среды в разные моменты времени τ , полученное на основе математического моделирования, при заданных условиях.

Для аналитического расчета принимается, что в начальный момент времени (в момент начала использования душевой) температура внутри нагреваемого и греющего потока одинакова и равна температуре внутреннего воздуха. После включения наблюдается нестационарный режим тепловой работы теплообменника, сменяющийся условно стационарным. Графики распределения температуры (5) и (6) на рис. 3 практически одинаковы, следовательно, для данного случая установившийся тепловой режим работы наступает в интервале от 4 до 5 минут после включения устройства.

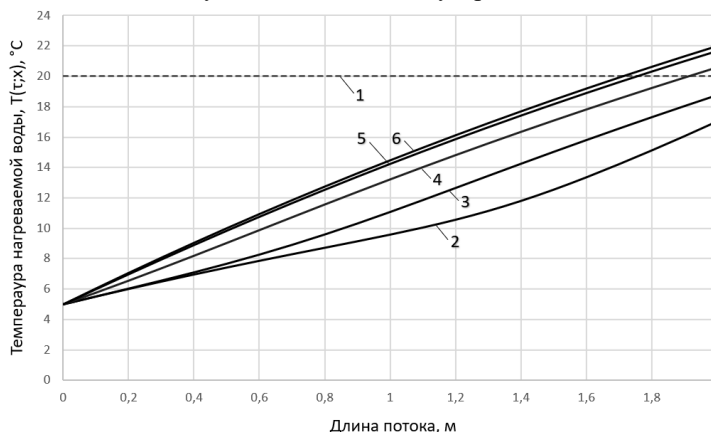


Рис. 3. Распределение температуры внутри потока нагреваемой среды в разные моменты времени после начала работы ТООУ, где 1 – $\tau = 0$ с; 2 – $\tau = 60$ с; 3 – $\tau = 120$ с; 4 – $\tau = 180$ с; 5 – $\tau = 240$ с; 6 – $\tau = 300$ с

Fig. 3. Temperature distribution inside the flow of the heated flow water at different times after the start of the heat exchange device operation, where 1 – $\tau = 0$ s; 2 – $\tau = 60$ s; 3 – $\tau = 120$ s; 4 – $\tau = 180$ s; 5 – $\tau = 240$ s; 6 – $\tau = 300$ s

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

При децентрализованной системе ГВС общее количество тепловой энергии, необходимое для работы душевой в течение 7 минут, определяется по формуле:

$$Q = G \cdot \tau_0 \cdot c_p \cdot (t_e - t_x), \quad (1)$$

где G – массовый расход нагреваемой среды в теплообменном аппарате, кг/с; c_p – теплоемкость воды Дж/(кг·К); $t_e = 40$ – температура нагреваемой воды (на выходе из водонагревателя), °C; t_x – температура нагреваемой воды на входе в водонагреватель, °C; $\tau_0 = 7 \cdot 60 = 420$ – длительность отдельного использования душа, с; c_p – теплоемкость воды, Дж/(кг·К).

На основе полученных данных о распределении температуры внутри потока во времени (рис. 3) определяется мощность теплообменного аппарата в каждый момент времени τ по формуле:

$$Q(\tau) = G \cdot c_p (T_2''(\tau) - T_2'), \quad (2)$$

где G – массовый расход нагреваемой среды в теплообменном аппарате, кг/с; c_p – теплоемкость воды Дж/(кг·К); $T_2''(\tau)$ – температура нагреваемой воды на выходе из теплообменного аппарата в момент времени τ , °C; T_2' – температура нагреваемой воды на входе в теплообменный аппарат в момент времени τ .

При использовании душевой в течение 7 минут количество полезно утилизированной теплоты, идущей на нагрев холодной воды, определяется на основе значения мощности ТООА в каждый момент времени его работы (2) согласно выражению:

$$\Delta Q = \int_0^{\tau_0} Q(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где $Q(\tau)$ – мощность ТООА в момент времени τ , Вт; τ_0 – длительность отдельного использования душа, с.

Средняя мощность ТООА во время использования душевой определяется по выражению $\bar{Q} = (\Delta Q / \tau_0)$, Вт.

Относительное снижение требуемой тепловой энергии для разового приема душа при использовании теплообменного аппарата определяется согласно выражению: $\varphi = (\Delta Q / Q) \cdot 100\%$.

На основе математического моделирования и формул (1-3) определены характеристики тепловой работы ТОА при массовом расходе сред $G = 0,14$ кг/с, начальном распределении температуры в обоих потоках $T(x,0) = 20$ °С, но разным значении температуры нагреваемой воды на входе в ТОА. Прочие данные для моделирования взяты из таблицы 1. Результат расчета представлен в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Характеристики тепловой работы ТОА
Characteristics of thermal operation of TOA

Температура нагреваемой воды на входе в ТОА, $t_{вх}$, °С	Тепловая инерция, Δt , с	Необходимое количество теплоты, Q , кДж	Количество полезно утилизированной теплоты, ΔQ , кДж	Экономия теплоты, φ , %
5	308	8644	3877	44,9
10	330	7409	3198	43,2
15	300	6174	2521	40,8
20	320	4939	1842	37,3

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Исследование влияния массового расхода сред на тепловую работу ТОА проводилось при $t_x = 5$ °С и начальном распределении температуры в потоках сред $T(x,0) = 20$ °С. При увеличении массового расхода нагреваемой и греющей среды с $G = 0,1$ кг/с до $G = 0,18$ кг/с уменьшается тепловая инерция ТОА с 280 секунд до 210 секунд. При этом увеличивается абсолютная экономия, но уменьшается относительная экономия тепловой энергии: при $G = 0,1$ кг/с $\Delta Q = 3404$ кДж и $\varphi = 55,1$ %; при $G = 0,18$ кг/с $\Delta Q = 4181$ кДж и $\varphi = 37,6$ %.

Исследование влияния начального распределения температуры на тепловую работу ТОА проводилось при $t_x = 5$ °С, $G = 0,14$ кг/с. При увеличении температуры нагреваемой и греющей среды в начальный момент времени (температуры внутреннего воздуха в помещении, в котором располагается ТОА) увеличивается абсолютная и относительная экономия теплоты: при $T(x,0) = 18$ °С $E = 3790$ кДж и $\varphi = 43,9$ %; при $T(x,0) = 24$ °С $E = 4052$ кДж и $\varphi = 46,9$ %. Тепловая инерция устройства при этом практически не меняется (относительная разница составляет $\approx 1\%$).

На рис. 4 представлены графики, описывающие тепловую работу утилизационного теплообменника и энергетический эффект от его использования в зависимости от длительности работы устройства (длительности использования душевой). Температура нагреваемой среды на входе в ТОА принималась $t_x = 5$ °С, начальное распределение температуры в потоках $T(x,0) = 20$ °С, массовый расход сред $G = 0,14$ кг/с.

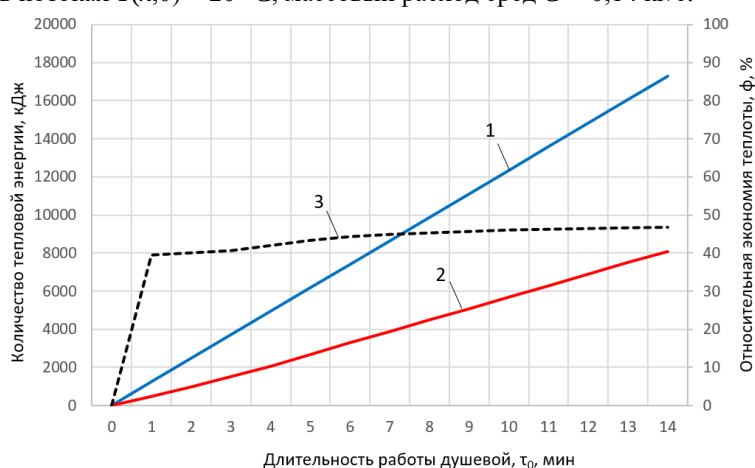


Рис. 4. Зависимость необходимой тепловой энергии для работы душа и сэкономленной тепловой энергии от длительности работы душа, где 1 – требуемое количество тепловой энергии для работы душевой, Q , кДж; 2 – сэкономленное количество тепловой энергии, ΔQ , кДж; 3 – относительное снижение требуемой тепловой энергии, φ , %

Fig. 4. Dependence of the required thermal energy for the operation of the shower and the saved thermal energy on the duration of the shower, where 1 – the required amount of thermal energy for the operation of the shower, Q , kJ; 2 – saved amount of thermal energy, ΔQ , kJ; 3 – relative reduction in required thermal energy, φ , %

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Обсуждение (Discussing)

Анализ результатов моделирования тепловой работы теплообменника показывает, что все исследуемые в работе условия эксплуатации влияют и на значение тепловой инерции, и на экономию тепловой энергии.

Особое внимание следует уделить влиянию температуры нагреваемой воды на эффективность утилизации теплоты (таблица 2). Относительное значение экономии теплоты при этом меняется незначительно (при $t_{вх}=5^{\circ}\text{C}$ относительная экономия $\varphi=44,9\%$, а при $t_x=20^{\circ}\text{C}$ относительная экономия $\varphi=37,3\%$). Но в абсолютных значениях экономия теплоты различается существенно (при $t_x=5^{\circ}\text{C}$ абсолютная экономия теплоты $\Delta Q=3877$ кДж, а при $t_x=20^{\circ}\text{C}$ значение составляет $\Delta Q=1842$ кДж). Данный факт объясняется необходимостью большего количества тепловой энергии для обеспечения нужд ГВС в холодный период года и, следовательно, потенциально большей абсолютной экономией теплоты.

Существенное влияние на эффективность утилизации также оказывает массовый расход сред. При $G=0,1$ кг/с экономия тепловой энергии $\varphi=55,1\%$; $\Delta Q=3404$ кДж, а при $G=0,18$ кг/с экономия тепловой энергии $\varphi=37,6\%$; $\Delta Q=4181$ кДж. Данный факт объясняется прямой зависимостью значений скорости сред от массового расхода. При меньшей скорости время теплообмена между средами увеличивается, но вместе с этим увеличивается и тепловая инерция устройства.

В меньшей степени оказывают влияние на тепловую работу устройства начальное распределение температуры. Закономерно, что в одинаковых условиях, отличающихся только начальной температурой греющей среды, большее количество теплоты будет сообщено холодной воде при наибольшей начальной температуре греющей воды. Так как область возможных значений температуры внутреннего воздуха сравнительно мала (согласно нормативной литературе), то и разница в абсолютных и относительных значениях сэкономленной тепловой энергии незначительна.

Анализ графиков на рис. 4 показывает важность учета фазы работы теплообменника при нестационарном тепловом режиме для корректного определения энергетического эффекта. Видно, что после определенного времени работы душевой (6-7 минут) количество полезно утилизированной тепловой энергии составляет $\approx 47\%$ и не возрастает со временем. Это максимальное располагаемое значение экономии теплоты для данного устройства и заданных условий эксплуатации. В случае использования теплообменника с такими параметрами в душевой, которая работает менее 6 минут, теплообменник всегда будет работать при нестационарном тепловом режиме и, следовательно, во время работы не будет достигать максимальной располагаемой мощности.

Заключение (Conclusions)

1. Получены данные о влиянии условий эксплуатации утилизационного теплообменника (массовый расход сред, начальное распределение температуры внутри потоков сред, температура нагреваемой воды на входе в теплообменник) на энергетический эффект от локальной утилизации теплоты сточных вод.

2. Чтобы корректно определить энергетический эффект от локальной утилизации теплоты сточных вод, условия эксплуатации теплообменного аппарата необходимо учитывать в каждом конкретном случае отдельно.

3. Наибольшее влияние на тепловую работу ТОА имеют массовый расход сред, температура холодной воды на входе в теплообменник и длительность отдельного использования душевой.

4. При проектировании утилизационного теплообменника возможен подбор лишь оптимальных параметров для конкретного случая, но не идеальных, так как кроме потенциального энергетического эффекта и срока окупаемости необходимо учитывать актуальную энергетическую, экономическую и экологическую политику, реализуемую в отношении определенного объекта теплоснабжения, а также доступный объем капитальных затрат на реализацию энергосберегающего мероприятия.

Литература

1. Королев В. И., Зверева Э.Р. Российский опыт применения отходов химводоподготовки в хозяйственной деятельности: перспективы использования при обработке осадков сточных вод (обзорная статья) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 6. С. 47-62.
2. Выборнов Д.В., Удовиченко З.В., Долгов Н.В. Исследование проблем утилизации теплоты канализационных стоков жилых зданий // Энергетические системы. 2021. Т. 6. № 1. С. 70-80.

3. Куницкий В. А., Лукин С.В. Исследование нестационарных режимов работы утилизационного теплообменного устройства на основе математического моделирования // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 4(56). С. 69-79.
4. Бежан А.В. Оценка потенциала тепла сточных вод в многоквартирных жилых зданиях (на примере города Апатиты) // Труды Кольского научного центра РАН. 2013. №2(15). С. 33-40.
5. Васильев Г.П., Дмитриев А.Н., Абуев И.М. и др. Квартирная утилизация теплоты сточных вод // Энергетик. 2013. № 12. С. 30-33.
6. Кобылкин М.В., Кобылкина А.В., Риккер Ю.О. Разработка эффективного бытового малогабаритного рекуператора теплоты сточных вод // Материалы XX Международной научно-практической конференции «Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов»; В 3-х частях, Чита, 30 ноября 2020 г., Чита: Забайкальский государственный университет, 2020. С. 128-132.
7. Владыкина А. Н. Повышение энергетической эффективности жилых домов // Устойчивое развитие науки и образования. 2019. № 7. С. 121-126.
8. Файзуллин А. А., Мамлеев А.Р. Теплонасосная установка для утилизации теплоты городских сточных вод // Наука молодых - будущее России: сборник научных статей 4-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. В 8-ми томах; 10–11 декабря 2019 г., Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. Т. 7. С. 100-101.
9. Юсупов Р.Д., Зиганшин Ш.Г., Политова Т.О. и др. Применение солнечной энергии для нужд горячего водоснабжения в городе Казань // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 2(54). С. 48-58.
10. Запольская И.Н. Влияние индивидуальных водо-водяных подогревателей на потребление тепловой энергии многоквартирными домами // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 3(51). С. 146-155.
11. Shahmohammadi S., Steinmann Z., King H. et al. The influence of consumer behavior on energy, greenhouse gas and water footprints of showering. Journal of Industrial Ecology. 2019. Vol. 23, N5. pp. 1186-1195.
12. Новицкая М. П. Теплообменный аппарат для утилизации теплоты сточных вод домохозяйства // Коммунальная и промышленная энергетика. 2018. Т.40(№1). С. 56-60.
13. Ziwen L., Qingxu H., Chunyang H. et al. Water-energy nexus within urban agglomeration: An assessment framework combining the multiregional input-output model, virtual water, and embodied energy // Resources, Conservation and Recycling, 2021. Vol. 164, pp. 105-113.
14. Sitzenfrei R., Hillebrand S., Rauch W. Investigating the interactions of decentralized and centralized wastewater heat recovery systems // Water Science and Technology. 2017. Vol.75 N5-6. pp. 1243-1250.
15. Feike F., Oltmanns J., Dammel F. et al. Evaluation of the waste heat utilization from a hot-water-cooled high performance computer via a heat pump // Energy reports. 2021. Vol. 7. pp. 70-78.
16. Meireles I., Sousa V., Bleys B. et al. Domestic hot water consumption pattern: Relation with total water consumption and air temperature // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022, Vol. 157.
17. Pomianowski M.Z., Johra H., Marszal-Pomianowska A. et al. Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 128.
18. Ivanko D., Sorensen A.L., Nord N. Selecting the model and influencing variables for DHW heat use prediction in hotels in Norway // Energy and Buildings. 2020. Vol. 228.
19. Куницкий В. А., Лукин С.В. Верификация нестационарной математической модели тепловой работы утилизационного теплообменного аппарата на основе экспериментального испытания // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 3(59). С. 57-69.
20. Soloveva O., Solovev S., Kunitsky V. et al. Determination of the optimal heat exchanger configuration for wastewater heat recovery // E3S Web of Conferences. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies (EMMFT-2023); 9-13 October 2023; Voronezh, Russia. Vol. 458.

Авторы публикации

Лукин Сергей Владимирович – д-р. техн. наук, профессор кафедры теплогазоводоснабжения, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет», s.v.luk@yandex.ru.

Куницкий Вячеслав Андреевич – преподаватель и аспирант кафедры теплогазоводоснабжения,

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет», globee@mail.ru.

References

1. Korolev V.I., Zvereva E.R. Russian experience in the use of chemical water treatment waste in economic activity: prospects for use in the treatment of sewage sludge (review article). *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24(6):47-62. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-47-62>
2. Vybornov D.V., Udovichenko Z.V., Dolgov N.V. Research of the problems of heat recovery of sewerage flows in residential buildings. *Energy Systems*. 2021; 6(1):70-80. (In Russ.) <https://doi.org/10.34031/es.2021.1.006>
3. Kunitskiy V.A., Lukin S.V. Research of non-stationary operation modes of utilization heat exchanger on the basis of mathematical modeling. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2022; 14(55):69-79. (In Russ.)
4. Bezhan A.V. Assessing the potential of sewage heat in apartment buildings (for example Apatity). *Transactions Kola Science Centre*. 2013; 2(15):33-40. (In Russ.)
5. Vasil'ev G.P., Dmitriev A.N., Abuev I.M., et al. Kvartirnaya utilizatsiya teploty stochnykh vod. *Energetik*. 2013; 12:30-33. (In Russ.)
6. Kobylkin M.V., Kobylkina A.V., Rikker Yu.O. Razrabotka effektivnogo bytovogo malogabaritnogo rekuperatora teploty stochnykh vod. In: *Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh protsessov: Materialy XX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. 30 Nov 2020; Chita, Russia*. Chita: Zabaikal'skii gosudarstvennyi universitet, 2020. pp. 128-132. (In Russ.)
7. Vladykina A. N. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti zhilykh domov. *Ustoichivoe razvitie nauki i obrazovaniya*. 2019; 7:121-126. (In Russ.)
8. Faizullin A. A., Mamleev A.R. Teplonasosnaya ustanovka dlya utilizatsii teploty gorodskikh stochnykh vod. in: *sbornik nauchnykh statei 4-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh. 10–11 Dec 2019; Kursk, Russia*. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet, 2019; 7. pp. 100-101. (In Russ.)
9. Yusupov R.D., Ziganshin S.G., Politova T.O., et al. Application of solar energy for the needs of hot water supply in the city of Kazan. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2022; 14; 2(54):48-58. (In Russ.)
10. Zapol'skaya I.N. Transfer of the hot water preparation function to the consumer by installation iwwh as a way to reduce heat consumption. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2021; 13; 3(51):146-155. (In Russ.)
11. Shahmohammadi S., Steinmann Z., King H. et al. The influence of consumer behavior on energy, greenhouse gas and water footprints of showering. *Journal of Industrial Ecology*. 2019. 23(5):1186-1195. <https://doi.org/10.1111/jiec.12858>
12. Novitskaya M. P. Teploobmennyy apparat dlya utilizatsii teploty stochnykh vod domokhozyaistva. *Komunal'na ta promislova energetika*. 2018; 40(1):56-60.
13. Ziwen L., Qingxu H., Chunyang H. et al. Water-energy nexus within urban agglomeration: An assessment framework combining the multiregional input-output model, virtual water, and embodied energy. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021. 164:105-113. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105113>
14. Sitzenfrei R., Hillebrand S., Rauch W. Investigating the interactions of decentralized and centralized wastewater heat recovery systems. *Water Science and Technology*. 2017; 75; (5-6):1243-1250. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.598>
15. Feike F., Oltmanns J., Dammel F. et al. Evaluation of the waste heat utilization from a hot-water-cooled high performance computer via a heat pump. *Energy reports*. 2021. (7):70-78. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.038>
16. Meireles I., Sousa V., Bleys B. et al. Domestic hot water consumption pattern: Relation with total water consumption and air temperature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022, 157. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112035>
17. Pomianowski M.Z., Johra H., Marszal-Pomianowska A. et al. Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020; 128. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109900>
18. Ivanko D., Sorensen A.L., Nord N. Selecting the model and influencing variables for DHW heat use prediction in hotels in Norway. *Energy and Buildings*. 2020. 228. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110441>
19. Kunitskiy V. A., Lukin S.V. Verification of the non-stationary mathematical model of the utilization heat exchanger thermal operation by experimental testing. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2023; 15; 3(59). 57-69. (In Russ.)

20. Soloveva O., Solovev S., Kunitsky V. et al. Determination of the optimal heat exchanger configuration for wastewater heat recovery // E3S Web of Conferences. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies (EMMFT-2023); 9-13 October 2023; Voronezh, Russia. (458). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345801024>

Authors of the publication

Sergey V. Lukin – Vologda State University, ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-3002-1078>.
s.v.luk@yandex.ru

Vyacheslav A. Kunitskiy – Vologda State University, globee@mail.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки)

Получено **25.12.2023 г.**

Отредактировано **19.02.2024 г.**

Принято **21.02.2023 г.**

Сдано в набор 15.04.2024 г.
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 500 экз.

Подписано к печати 31.05.2024 г.
Усл. печ. л. 18,3
Заказ № 5297
Дата выхода в свет

Формат 60*90/8
Уч.изд. л. 11,62.
Цена свободная

